



TUGAS AKHIR - TL 141584

PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN VARIASI GEOMETRI DAN LUAS PERMUKAAN ANODA DI DALAM TANAH

**BEDRY NURHADI
NRP 2713 100 133**

**Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK
ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE
B DENGAN OPTIMASI ARUS PROTEKSI
DALAM KONDISI VARIASI JENIS PELAPISAN
DAN VARIASI GEOMETRI ANODA DI DALAM
TANAH**

**BEDRY NURHADI
NRP 2713 100 133**

Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**DESIGN OF IMPRESSED CURRENT CATHODIC
PROTECTION ON STEEL PIPE API 5L GRADE B
WITH OPTIMIZATION OF CURRENT
PROTECTION ON VARIATION CONDITION OF
COATING TYPE AND GEOMETRY OF ANODES
IN SOIL**

**BEDRY NURHADI
NRP 2713 100 133**

Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Korosi dan Pengendalian Korosi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

BEDRY NURHADI

NRP 2713 100 133

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc (Pembimbing I)

Budi Agung Kurniawan, S.T, M.Sc (Pembimbing II)



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja
API 5L Grade B dengan Variasi Geometri dan Luas Permukaan
Anoda di Dalam Tanah

Nama : Bedry Nurhadi
NRP : 2713100133
Departemen : Teknik Material ITS
Dosen Pembimbing : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T, M.Sc.
Budi Agung Kurniawan, S.T, M.Sc.

ABSTRAK

Korosi adalah penurunan mutu logam akibat reaksi elektro kimia dengan lingkungannya. Proses perkaratan termasuk proses elektrokimia, di mana logam Fe yang teroksidasi bertindak sebagai anode dan oksigen yang terlarut dalam air yang ada pada permukaan besi bertindak sebagai katode. Proteksi katodik merupakan salah satu cara yang digunakan banyak orang dalam pengendalian korosi, salah satu metode yang digunakan adalah metode *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* yang menggunakan arus balik untuk menahan laju korosi. Penelitian ini menggunakan metode ICCP. Bahan penelitian berupa katoda berupa spesimen baja API 5L Grade B dan anoda grafit. Variabel yang digunakan dalam penelitian ada dua, yang pertama adalah *coating* dua lapis dan tanpa *coating* dan yang kedua adalah variasi geometri anoda yaitu bentuk silinder panjang, bentuk silinder pendek, dan bentuk kubus. Pipa memiliki panjang sebesar 1.5 m dengan lebar diameter 0.0508 m sementara anoda memiliki luas permukaan yang berbeda masing-masing 142 cm², 132 cm², dan 162 cm². Pengukuran saat penelitian adalah pengukuran arus proteksi dan tegangan proteksi, serta pengukuran pH dan resistivitas tanah untuk mengetahui faktor lain yang dapat mempengaruhi sistem ICCP. Pipa yang diberikan perlakuan *coating* cenderung memerlukan arus proteksi yang lebih kecil disbanding dengan pipa tanpa *coating* yaitu sebesar 18-22 mA. Sementara itu, anoda yang



memiliki luas permukaan yang besar, cenderung dapat mengeluarkan arus keluaran maksimum yang besar pula seperti anoda C yang memerlukan kebutuhan arus proteksi hanya 6 mA

Kata kunci: Korosi, Proteksi Katodik, Arus Paksa, Pipa API 5L, Anoda Grafit, Geometri, Luas Permukaan



*Design of Impressed Current Cathodic Protection on Steel Pipes
API 5L Grade B with Variation on Geometry and Surface Area of
Anodes in Soil*

Nama : Bedry Nurhadi
NRP : 2713100133
Departement : Teknik Material ITS
Advisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T, M.Sc.
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Corrosion is the degradation of metal quality due to electrochemical reactions to the environment. The process of carnation includes the electrochemical process, Fe metals act as anode and oxygen dissolved in water present on the iron surface acts as a cathode. Cathodic protection is one way that many people use in corrosion control, one of the methods used is Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) method that uses backflow to withstand the rate of corrosion. This research uses ICCP method. Research materials are API 5L pipesteel as cathode and graphite anode. There were two variables that used, the first is coating two layers and without coating and the second is anode geometry variation of the long cylinder shape, short cylinder shape, and cube shape. The pipe has a length of 1.5 m, with a diameter width of 0.0508 m while the anode has a respective surface area of 142 cm², 132 cm², and 162 cm². The measurement that is needed were of protection current and protection voltage, and pH and soil resistivity measurements to determine other factors that may affect ICCP system. The pipe provided by the coating treatment tends to require a smaller protection current than the uncoated pipe 18-22 mA. Meanwhile, the anode having a large surface area, tends to output a large maximum output current as well as anode C which requires a current protection current of only 6 mA



Keywords: *Corrosion, Impressed Current Cathodic Protection, Cathode, Anode, Geometry, Surface Area*



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir serta menyusun laporan tugas akhir dengan judul **“Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan Optimasi Arus Proteksi Dalam Kondisi Variasi Pelapisan dan Variasi Geometri Anoda di Dalam Tanah”**.

Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi mata kuliah tugas akhir yang menjadi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Departemen Teknik Material - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, diantaranya:

1. Kedua orang tua serta kedua saudara penulis yang telah memberikan banyak doa, dukungan moril dan materiil, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi kepada penulis.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Kepala Departemen Teknik Material FTI – ITS.
3. Bapak Tubagus Nur Rohmannudin, S. T, M. Sc selaku dosen pembimbing satu tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T, M.Sc. selaku dosen pembimbing dua tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.



5. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
6. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T, M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan memberikan motivasi selama penulis menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Tim Dosen Penguji seminar dan sidang tugas akhir, serta seluruh bapak dan ibu dosen dan karyawan di lingkungan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang tak kenal lelah dalam mendidik putra-putri terbaik bangsa ini.
8. Maulana, Pribadi, Dcebunk, Nia, Ilmi, Igfar, Kresna, Tanyo, Ayu, Rizal, dan seluruh pengguna Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material
9. Radhif Irzan Musyafa
10. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2017
Penulis,

Bedry Nurhadi S.
2713100133



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi	5
2.2 Jenis-Jenis Korosi.....	7
2.3 Proteksi Katodik	11
2.3.1 Dasar Listrik Pada Proteksi Katodik	11
2.3.2 Tipe Proteksi Katodik	16
2.3.3 Prinsip Proteksi Katodik	17
2.4 <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	18
2.5 Anoda	21
2.6 Lapisan Pelindung	25
2.7 Potensial Proteksi dan Elektroda Acuan	30
2.8 Rancangan Perhitungan	37
2.9 Survey Resistivitas Tanah	40
2.10 Diagram Pourbaix	42
2.11 Penelitian Sebelumnya.....	44
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	49
3.2 Bahan	50
3.3 Peralatan	53



3.4 Langkah Perancangan	54
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perencanaan Perancangan	63
4.1.1 Kriteria Desain	63
4.1.2 Standar Desain Perancangan	63
4.2 Pengumpulan Data	63
4.2.1 Data Material	63
4.2.2 Data Lapis Lindung	64
4.2.3 Data Tanah	65
4.2.3.1 Pengukuran Resistivitas Tanah	65
4.2.3.1 Pengukuran pH Tanah	68
4.3 Perhitungan Desain	70
4.3.1 Luas permukaan yang Diproteksi	70
4.3.2 Kebutuhan Arus Proteksi	71
4.3.3 Kebutuhan Anoda	72
4.4 Pengukuran Arus dan Potensial	74
4.5 Hasil Proteksi	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	99
5.2 Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN	103
BIODATA PENULIS	107



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Sel Elektrokimia Mengindikasikan Elemen Dasar Korosi	6
Gambar 2.2 Jenis – Jenis Korosi	10
Gambar 2.3 Sirkuit Listrik Sederhana.....	13
Gambar 2.4 Contoh Hukum Khircoff.....	14
Gambar 2.5 Rangkaian Sirkuit.....	15
Gambar 2.6 Proteksi katodik dengan anoda korban	16
Gambar 2.7 Sistem proteksi ICCP pada <i>Pipeline</i> yang tertanam dalam tanah menggunakan anoda grafit	20
Gambar 2.8 Mekanisme <i>Millscale Induced Corrosion</i>	26
Gambar 2.9 <i>Pipe to Electrolyte Potential</i>	31
Gambar 2.10 <i>Electrode Potential Hydrogen Scale</i>	32
Gambar 2.11 Grafik IR Drop Potensial.....	34
Gambar 2.12 <i>Log Cumulative Failure</i>	36
Gambar 2.13 Konfigurasi Metode Wenner	41
Gambar 2.14 Diagram Pourbaix	43
Gambar 2.15 Grafik Arus proteksi pipa (TA)	45
Gambar 2.16 Arus Proteksi Pipa dengan Variasi Coating	46
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	49
Gambar 3.2 Pipa Baja API 5L Grade B	51
Gambar 3.3 Anoda Grafit Berbentuk Silinder	51
Gambar 3.4 Cat Coating Primer dan Sekunder	52
Gambar 3.5 Kabel Tembaga 2.5 mm	52
Gambar 3.6 Transformator Rectifier	53
Gambar 3.7 Elektroda Reference Cu/CuSO ₄	53
Gambar 3.8 Avometer	54
Gambar 3.9 Alat pengujian Resistivitas Tanah Metode Wenner	55
Gambar 3.10 Pengait kabel pada pipa	58
Gambar 3.11 Anoda dengan tiga bentuk yang berbeda	59
Gambar 3.12 Penanaman Pipa	59
Gambar 3.13 Penanaman Anoda	60
Gambar 3.14 Pengujian Tegangan Proteksi	60
Gambar 4.1 Pengujian Resistivitas Tanah	65



Gambar 4.2 Pengujian Potensial Pipa	75
Gambar 4.3 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating	79
Gambar 4.4 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder	79
Gambar 4.5 Grafik Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating	86
Gambar 4.6 Grafik Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder	86
Gambar 4.7 Pipa Tanpa Coating setelah 20 hari pemberian arus proteksi	88
Gambar 4.8 Pipa dengan coating Primer dan Sekunder setelah 20 hari pemberian arus proteksi	89
Gambar 4.9 Permukaan pipa tanpa coating setelah 20 hari	91
Gambar 4.10 Permukaan pipa coating primer dan Sekunder setelah 20 hari	92
Gambar 4.11 Sambungan lasan pada pipa tanpa coating	94
Gambar 4.12 Sambungan lasan pada pipa coating primer dan sekunder	95
Gambar 4.13 Permukaan Pipa Tanpa Coating	97
Gambar 4.14 Permukaan Pipa Coating Dua Lapis	97



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Antara Sistem Anoda Tumbal dan Arus Paksa	17
Tabel 2.2 Jenis Anoda Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa	22
Tabel 2.3 Tabel Pourbaix pada suhu 25°C untuk pH 1-14	33
Tabel 2.2 Nilai Elektroda Acuan	37
Tabel 2.3 Klasifikasi Resistivitas Tanah.....	37
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja	64
Tabel 4.2 Spesifikasi Anoda.....	64
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah Pada Pipa Tanpa Coating	66
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah Pada Pipa Coating Dua Lapis	67
Tabel 4.5 Hasil pengukuran pH Pada Pipa Tanpa Coating	69
Tabel 4.6 Hasil pengukuran pH Pada Pipa Coating Dua Lapis ..	69
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Tanpa Coating Sebelum Proteksi	75
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Coating Primer dan Sekunder Sebelum Proteksi	75
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder panjang	76
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder Pendek	76
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Kubus	77
Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Panjang	77
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Pendek	78
Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Kubus	78



Tabel 4.15 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder panjang	83
Tabel 4.16 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder Pendek	83
Tabel 4.17 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Kubus	84
Tabel 4.18 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Panjang	84
Tabel 4.19 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Pendek	85
Tabel 4.20 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Kubus	85
Tabel 4.21 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Tanpa Coating Setelah Proteksi.....	87
Tabel 4.22 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Coating Primer dan Sekunder Setelah Proteksi	87



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan struktur yang terbuat dari besi dan baja kini memiliki peranan yang sangat penting dalam dunia industri terutama pada penggunaan untuk saluran air, saluran gas, maupun tiang konstruksi. Struktur yang diaplikasikan pada kegiatan tersebut didesain sedemikian rupa agar dapat dipakai hingga 30-50 tahun. Namun pada kenyataannya timbul banyak permasalahan yang menyebabkan turunnya kualitas baja tersebut hingga terjadi kerusakan yang sangat parah. Hal ini dikarenakan korosi yang menjadi penyebab utama terhadap kegagalan material dimana dampak yang ditimbulkan akan berimbas pada lingkungan dan ekonomi.

Korosi merupakan permasalahan utama pada peralatan dan struktur bahan yang terbuat dari logam. Korosi atau karat dapat mengikis struktur pada logam sampai pada taraf yang sangat merusak. Amerika Serikat mengalokasikan biaya pengendalian korosi sebesar 80 hingga 126 milyar dollar per tahun. Hasil riset yang berlangsung tahun 2002 di Amerika Serikat memperkirakan, kerugian akibat korosi yang menyerang permesinan industri, infrastruktur, sampai perangkat transportasi di Negara adidaya itu mencapai 276 miliar dollar AS. Ini berarti 3,1 persen dari *Gross Domestic Product (GDP)*-nya. Di Indonesia sekitar dua puluh tahun ke belakang, biaya yang ditimbulkan akibat korosi dalam bidang industri mencapai 5 trilyun rupiah. Nilai tersebut memberi gambaran betapa besarnya dampak yang ditimbulkan korosi. Kerugian yang ditimbulkan akibat korosi di industri dapat dikategorikan menjadi kerugian dengan dampak yang bersifat langsung dan tidak langsung. Kerugian langsung adalah dapat berupa terjadinya kerusakan pada peralatan, mesin dan stuktur-struktur yang berbahan dasar logam bahkan dapat menimbulkan kecelakaan, sedangkan kerugian tidak langsung dapat berupa terhentinya aktivitas produksi karena terjadinya kerusakan



peralatan akibat korosi. Selain itu, kondisi pada struktur yang dipendam didalam tanah dapat membuat masalah menjadi lebih kompleks. Korosi tanah tidak hanya dipengaruhi oleh pengukuran resistivitas tanah dan potensial struktur terhadap tanah. Namun terdapat banyak faktor yang dapat menyebabkan timbulnya korosi pada tanah, diantaranya ialah jenis tanah, kelembaban, dan pH tanah.

Proteksi katodik merupakan salah satu cara yang digunakan banyak orang dalam pengendalian korosi, dimana penggunaan proteksi katodik banyak digunakan untuk melindungi struktur pipa, tangki, tiang kapal, dll dari korosi. Salah satu metode yang digunakan adalah metode *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* yang menggunakan arus balik untuk menahan laju korosi. Metode *ICCP* seringkali digunakan untuk melindungi struktur pipa karena dapat memproteksi dengan jangkauan yang lebih luas serta sistem yang dapat dipakai untuk waktu yang lama. Metode proteksi katodik juga dapat dikombinasikan dengan metode *coating* dimana penggunaan *coating* dapat memberikan hasil yang berbeda pula.

Untuk mengetahui perancangan sistem proteksi katodik yang optimal, maka dilakukan perhitungan serta penelitian terhadap kebutuhan arus proteksi dan Kebutuhan Anoda Aluminium terhadap penggunaan *coating* agar dapat menghasilkan rancangan sistem proteksi yang maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana Perhitungan dan Perancangan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada spesimen baja API 5L Grade B?
2. Bagaimana pengaruh geometri dan luas permukaan anoda dalam Perancangan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada spesimen baja API 5L Grade B?



1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Dimensi pipa pada penelitian dianggap sama
2. Ketiga macam bentuk anoda dianggap memiliki nilai yang sama
3. Pipa pada penelitian dalam keadaan tertutup

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tugas akhir ini antara lain:

1. Merancang sistem proteksi *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada spesimen baja API 5L Grade B
2. Menganalisa pengaruh geometri dan luas permukaan anoda dalam Perancangan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* pada spesimen baja API 5L Grade B

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

1. Menghasilkan perhitungan dan perancangan desain sistem proteksi *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*
2. Mempelajari pengaruh geometri dan luas permukaan anoda dalam kebutuhan arus proteksi pada sistem proteksi *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



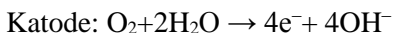
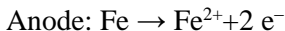
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Korosi

Korosi (Kennet dan Chamberlain, 1991) adalah penurunan mutu logam akibat reaksi elektro kimia dengan lingkungannya. Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan–bahan logam yang pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Contoh yang paling umum, yaitu kerusakan logam besi dengan terbentuknya karat oksida. Dengan demikian, korosi menimbulkan banyak kerugian. Korosi dapat juga diartikan sebagai serangan yang merusak logam karena logam bereaksi secara kimia atau elektrokimia dengan lingkungan. Dalam kehidupan sehari-hari, besi yang teroksidasi disebut dengan karat dengan rumus $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Proses perkaratan termasuk proses elektrokimia, di mana logam Fe yang teroksidasi bertindak sebagai anode dan oksigen yang terlarut dalam air yang ada pada permukaan besi bertindak sebagai katode.

Reaksi perkaratan:



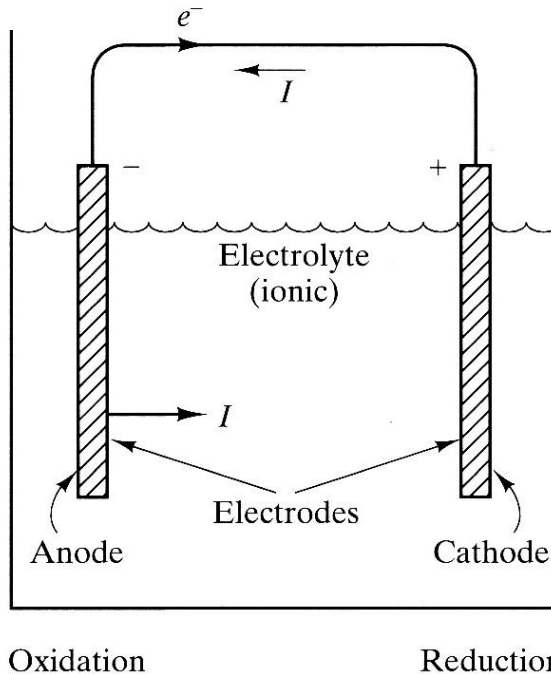
Fe^{2+} yang dihasilkan, berangsur-angsur akan dioksidasi membentuk Fe^{3+} . Sedangkan OH^{-} akan bergabung dengan elektrolit yang ada di alam atau dengan ion H^{+} dari terlarutnya oksida asam (SO_2 , NO_2) dari hasil perubahan dengan air hujan. Dari hasil reaksi di atas akan dihasilkan karat dengan rumus senyawa $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Karat ini bersifat katalis untuk proses perkaratan berikutnya yang disebut autokatalis.

Prinsip korosi berdasarkan pada elektrokimia dan diilustrasikan dengan sebuah sel elektrokimia. Sel terdiri dari dua elektroda yang terhubung, satu anoda dan satu katoda, keduanya terhubung dalam suatu larutan elektrolit. Ketika korosi terjadi, proses oksidasi berlangsung bersamaan dengan proses reduksi,



yang kemudian dinamakan proses redoks. Proses oksidasi terjadi pada anoda, sedang reduksi pada katoda.

Sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) menggunakan prinsip yang sama dengan pipa yang akan dilindungi sebagai katoda dan grafit sebagai anoda.



Gambar 2.1 Skema Sel Elektrokimia Mengindikasikan Elemen Dasar Korosi (Wright, 2015)

Korosi merupakan penurunan kualitas yang disebabkan oleh reaksi kimia bahan logam dengan unsur-unsur lain yang terdapat di alam. Korosi yang di berdasarkan proses elektro-kimia (*electrochemical process*) terdiri dari 4 komponen utama yaitu:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



a) *Anode* (Anoda)

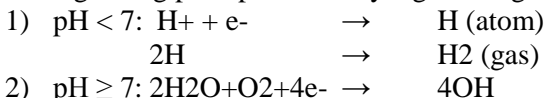
Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion-ion ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi pada anoda dapat dituliskan dengan persamaan:



Dengan z adalah valensi logam dan umumnya $z = 1, 2$, atau 3 .

b) *Cathode* (Katoda)

Katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun mungkin menderita kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Reaksi yang terjadi pada katoda berupa reaksi reduksi. Reaksi pada katoda tergantung pada pH larutan yang bersangkutan, seperti:



c) Elektrolit

Elektrolit adalah larutan yang mempunyai sifat menghantarkan listrik. Elektrolit dapat berupa larutan asam, basa dan larutan garam. Larutan elektrolit mempunyai peranan penting dalam korosi logam karena larutan ini dapat menjadikan kontak listrik antara anoda dan katoda.

d) Anoda dan Katoda harus terhubung secara elektrik

Antara anoda dan katoda harus ada hubungan listrik agar arus dalam sel korosi dapat mengalir. Hubungan secara fisik tidak diperlukan jika anoda dan katoda merupakan bagian dari logam yang sama.

1.2 Jenis-Jenis Korosi

Kebanyakan logam ada secara alami sebagai bijih-bijih yang stabil dari oksida-oksida, karbonat atau sulfida. Diperlukan energi untuk mengubah bijih logam menjadi sesuatu yang bermanfaat, Korosi hanyalah perjalanan sifat pembalikan satu proses yang tidak wajar kembali kepada suatu keadaan tenaga yang lebih rendah.



Secara umum, tipe dari korosi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Korosi Seragam (*Uniform Corrosion*)

Korosi seragam merupakan korosi dengan serangan merata pada seluruh permukaan logam. Korosi terjadi pada permukaan logam yang terekspos pada lingkungan korosif.

2. Korosi Galvanik

Korosi galvanik terjadi jika dua logam yang berbeda tersambung melalui elektrolit sehingga salah satu dari logam tersebut akan terserang korosi sedang lainnya terlindungi dari korosi. Untuk memprediksi logam yang terkorosi pada korosi galvanic dapat dilihat pada deret galvanik

3. Korosi Celah

Mirip dengan korosi galvanik, dengan pengecualian pada perbedaan konsentrasi media korosifnya. Celah atau ketidakrataan permukaan lainnya seperti celah paku keling (*rivet*), baut, *washer*, gasket, deposit dan sebagainya, yang bersentuhan dengan media korosif dapat menyebabkan korosi terlokalisasi

4. Korosi Sumuran

Korosi sumuran terjadi karena adanya serangan korosi lokal pada permukaan logam sehingga membentuk cekungan atau lubang pada permukaan logam. Korosi logam pada baja tahan karat terjadi karena rusaknya lapisan pelindung (*passive film*)

5. Retak Pengaruh Lingkungan (*environmentally induced cracking*)

Merupakan patah getas dari logam paduan ulet yang beroperasi di lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi seragam. Ada tiga jenis tipe perpatahan pada kelompok ini, yaitu: *stress corrosion cracking* (SSC), *corrosion fatigue cracking* (CFC), dan *hydrogen-induced cracking* (HIC)

6. Kerusakan Akibat Hidrogen (*Hydrogen damage*)

Kerusakan ini disebabkan karena serangan hydrogen yaitu reaksi antara hydrogen dengan karbida pada baja dan membentuk metana sehingga menyebabkan terjadinya dekarburasi, rongga,

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



atau retak pada permukaan logam. Pada logam reaktif seperti titanium, magnesium, zirkonium dan vanadium, terbentuknya hidrida menyebabkan terjadinya pengetasan pada logam.

7. Korosi Batas Butir (*intergranular corrosion*)

Korosi yang menyerang pada batas butir akibat adanya segregasi dari unsur pasif seperti krom meninggalkan batas butir sehingga pada batas butir bersifat *anodic*. Korosi intergranular adalah bentuk korosi yang terjadi pada paduan logam akibat terjadinya reaksi antar unsur logam tersebut di batas butirnya. Seperti yang terjadi pada baja tahan karat austenitik apabila diberi perlakuan panas. Pada temperatur 425–815°C karbida krom (Cr_{23}C_6) akan mengendap di batas butir. Dengan kandungan krom dibawah 10 %, di daerah pengendapan tersebut akan mengalami korosi dan menurunkan kekuatan baja tahan karat tersebut. Korosi intergranular terjadi pada daerah tertentu dengan penyebab grain boundary. Hal ini disebabkan oleh adanya kekosongan unsur/elemen pada kristal ataupun impurities dari proses casting. Korosi ini terjadi pada casting and welding.

8. Dealloying

Dealloying adalah lepasnya unsureunsur paduan yang lebih aktif (anodik) dari logam paduan, sebagai contoh: lepasnya unsur seng atau Zn pada kuningan (Cu–Zn) dan dikenal dengan istilah *densification*.

9. Korosi Erosi

Korosi erosi disebabkan oleh kombinasi fluida korosif dan kecepatan aliran yang tinggi. Bagian fluida yang kecepatan alirannya rendah akan mengalami laju korosi rendah, sedangkan fluida kecepatan tinggi menyebabkan terjadinya erosi dan dapat sehingga mempercepat korosi.

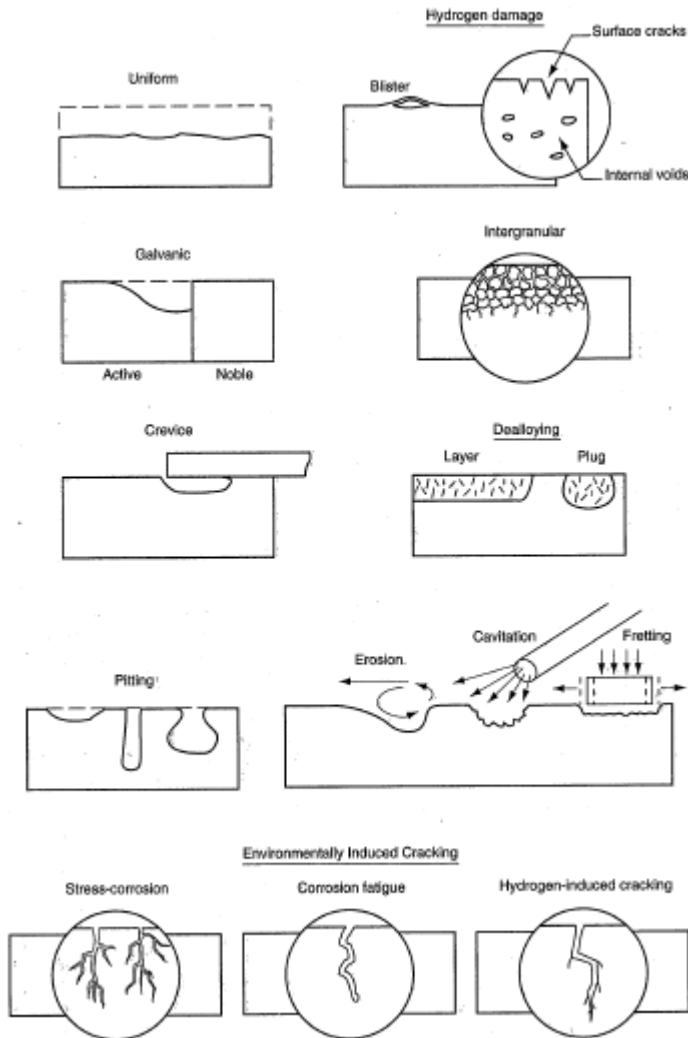
10. Korosi Aliran (*Flow Induced Corrosion*)

Korosi Aliran digambarkan sebagai efek dari aliran terhadap terjadinya korosi. Meskipun mirip, antara korosi aliran dan korosi erosi adalah dua hal yang berbeda. Korosi aliran adalah peningkatan laju korosi yang disebabkan oleh turbulensi fluida dan perpindahan massa akibat dari aliran fluida diatas permukaan



logam. Korosi erosi adalah naiknya korosi dikarenakan benturan secara fisik pada permukaan oleh partikel yang terbawa fluida.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.2 Jenis – Jenis Korosi (Jones, 1991)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.3 Proteksi Katodik

Proteksi katodik sudah dikenal sejak 170 tahun, Penggunaan pertama CP adalah pada tahun 1852, ketika Sir Humphry Davy, salah seorang perwira AL Inggris, melekatkan sebungkah besi pada bagian luar badan kapal berlapis tembaga yang terendam air. Besi cenderung lebih mudah mengalami korosi yang menimbulkan karat dibandingkan dengan tembaga sehingga ketika dilekatkan pada badan kapal, laju korosi pada tembaga akan menjadi turun.

Berdasarkan ASM Metal Handbook (1987), proteksi katodik adalah sebuah cara yang digunakan untuk mengontrol korosi dimana reaksi oksidasi pada sel galvanik dikonsentrasikan pada anoda sehingga dapat menekan korosi pada katoda di sel yang sama.

2.3.1 Dasar Listrik pada Proteksi Katodik

Bekerja sebagai seorang teknisi proteksi katodik setidaknya kita harus paham mengenai dasar listrik karena kita akan banyak bermain dengan yang namanya arus listrik, tegangan AC/DC, tahanan listrik, anoda, katoda dan banyak sekali istilah listrik. Jika kita tidak memahami dasar – dasar listrik sama sekali, maka akan sulit memahami proses bekerjanya system proteksi katodik dan melakukan analisa jika sistem proteksi katodik mengalami kerusakan.

Salah satu konsep dasar yang banyak digunakan adalah Ohm Law yang ditemukan oleh George Simon Ohm pada tahun 1828 mengenai keterkaitan antara voltase, arus dan tahanan listrik. Hampir disemua peralatan yang bekerja dengan arus listrik baik itu arus listrik AC maupun DC menggunakan Ohm law. Karena itu kita akan mendefinisikan untuk voltase, arus dan tahanan.

1. Voltage (E atau V)

Voltage dapat didefinisikan sebagai perbedaan potensial. Potensial berkaitan dengan kemampuan untuk melakukan kerja. Bila kita melakukan pengukuran antara kedua terminal pada sebuah baterai, pada dasarnya adalah kita mengukur perbedaan potensial antara kedua terminal tersebut. Voltage disebut juga



dengan electromotive force atau kemampuan untuk memaksa electron mengalir. Karena itu symbol untuk voltage sering ditulis E yang diambil dari Electromotive Force. Satuan untuk Voltage adalah “Volt”

2. Current (I)

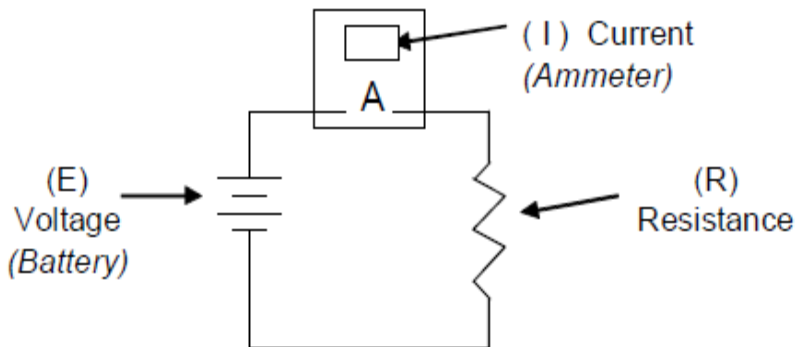
Current atau arus listrik dapat didefinisikan sebagai aliran electron. Ketika terjadi perbedaan potensial antara kedua terminal, maka akan terjadi aliran electron dari potensial yang lebih negative menuju potensial yang lebih positif. Aliran electron inilah yang disebut dengan arus listrik. Arus listrik dilambangkan dengan symbol I yang diambil dari kata Intensity. Maksudnya adalah pengukuran dilakukan untuk mengetahui seberapa sering atau konsentrasi dari electron yang mengalir. Satuan dari arus adalah ampere (A).

3. Resistance (R)

Resistance atau tahanan didefinisikan sebagai penghambat arus listrik mengalir. Tergantung dari struktur material yang terdapat dalam bahan maka sebuah bahan dapat bersifat konduktor, semi konduktor atau isolator. Sifat bahan ini tergantung dari jumlah electron yang dapat membantu aliran listrik mengalir ketika perbedaan potensial terjadi pada bahan tersebut. Konduktor mempunyai banyak electron bebas, karena itulah arus listrik mudah mengalir. Semi konduktor mempunyai lebih sedikit electron bebas, karena itu jumlah arus yang mengalir terbatas. Sedangkan isolator mempunyai sangat sedikit electron bebas, karena itu mempunyai kemampuan menghambat arus listrik dengan sangat kuat. Satuan dari tahanan adalah Ohm, yang diambil dari nama penemu ohm law yaitu George Ohm dan sering ditulis dengan lambang omega (Ω). Simbol dari tahanan adalah R diambil dari kata Resistance.

4. Ohm Law

George Ohm pada tahun 1828 melakukan penelitian terhadap hubungan antara ketiga istilah diatas dengan membuat sebuah rangkaian yang sederhana.



Gambar 2.3 Sirkuit Listrik Sederhana (Robert ,2008)

Dari rangkaian tersebut diketahui bahwa ketika voltase yang mengalir konstan, maka arus dan tahanan akan saling berlawanan atau dengan kata lain ketika arus listrik naik maka tahanan akan turun begitu sebaliknya.

Ketika pada rangkaian tersebut dijaga tahanan secara konstan, maka nilai arus berbanding lurus dengan voltase atau dengan kata lain ketika voltase dinaikkan maka arus listrik juga naik begitu sebaliknya.

George Ohm menemukan bahwa hubungan antaranya ketiganya adalah tetap seperti ini tidak pernah berubah. Karena itulah dapat dirumuskan dalam persamaan matematis:

$$E = I \times R$$

Jika kita mempunyai arus sebesar 2 A dan tahanan sebesar 10 ohm maka kita akan mendapatkan voltase sebesar $2 \times 10 = 20$ volt. Jika kita menggunakan arus sebesar separuhnya yaitu 1 A dengan tahanan tetap 10 ohm maka voltase yang didapat adalah 10 V atau turun 50 %. Hal ini membuktikan kesimpulan dari George bahwa arus dan voltase berbanding lurus, jika arus turun 50 % maka voltase juga turun 50 %.

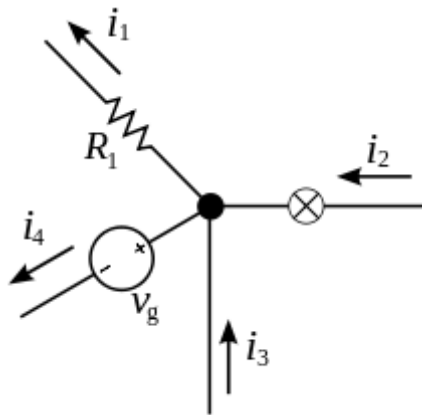
Selain dari hukum ohm, maka ada satu lagi hukum yang penting untuk diketahui yaitu hukum Kirchoff yang ditemukan



oleh ilmuwan jerman yang bernama Gustav Kirchoff pada tahun 1945. Ada 2 hukum yang ditemukan kirchof berkaitan dengan arus dan voltase.

5. Current Law atau Hukum arus

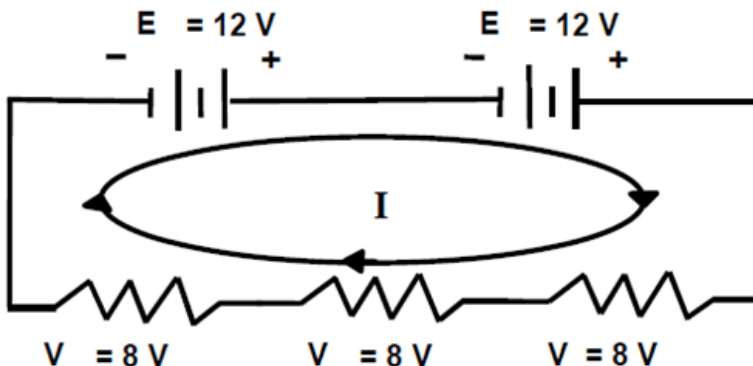
Hukum arus ini disebut juga sebagai hukum pertama Kirchoff yang berbunyi “Jumlah arus yang masuk pada sebuah persambungan sama dengan jumlah arus yang keluar pada persambungan tersebut” atau jika dituliskan dengan persamaan adalah:



Gambar 2.4 Contoh Hukum Khircoff (Robert ,2008)

6. Voltage Law atau Hukum Voltase

Hukum voltase ini disebut juga dengan hukum Kirchoff kedua yang berbunyi “Jumlah dari semua beda potensial yang ada dalam satu sirkuit tertutup sama dengan nol” atau dengan kata lain adalah jumlah dari sumber arus yang ada dalam sebuah siklus tertutup sama dengan nilai voltage drop pada semua tahanan yang ada di sirkuit tersebut. Sebagai contoh adalah:



Gambar 2.5 Rangkaian Sirkuit (Robert ,2008)

Jumlah sumber voltase sebesar $12\text{ V} + 12\text{ V} = 24\text{ V}$ sama dengan jumlah voltase yang drop yaitu $8\text{ V} + 8\text{ V} + 8\text{ V} = 24\text{ V}$

Driving voltage sebesar 24 Volt mengalir pada sebuah sirkuit tertutup dengan 3 resistor dengan nilai yang sama, maka pada masing-masing resistor menahan voltase sebesar 8 V. Jika digunakan resistor dengan nilai yang berbeda-beda maka nilai voltage dropnya tetap sebesar 24V.

Kegunaan kedua hukum tersebut dalam system proteksi katodik adalah untuk menghitung dan memprediksi jumlah arus ataupun voltase yang akan mengalir dalam sebuah rangkaian seri atau parallel.

Rangkaian seri adalah sebuah sirkuit tertutup dengan sumber arus yang sama mengalir sepanjang sirkuit dan kemudian kembali kepada sumber arus semula. Rangkaian seri dapat ditemukan pada rangkaian kabel TR ke groundbed dan kabel dari galvanic anoda ke pipa. Rangkain seri mempunyai sifat:

- Nilai arus diseluruh bagian rangkaian adalah sama
- Nilai voltage drop tergantung dari masing – masing tahanan yang ada
- Jumlah Tahanan total adalah sama dengan jumlah nilai masing-masing tahanan.

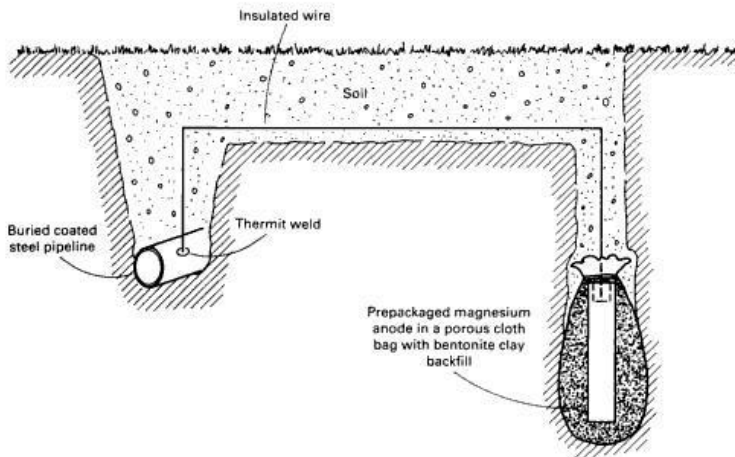


2.3.2 Tipe Proteksi Katodik

Dalam proteksi katodik, ada dua metode yang dapat dilakukan. Metode pertama adalah dengan menghubungkan struktur dengan logam yang lebih reaktif (potensial lebih rendah) sehingga logam anoda teroksidasi disebut sebagai anoda tumbal. Metode kedua yaitu dengan menghubungkan struktur logam yang lebih pasif (potensial lebih tinggi) ditambahkan dengan arus yang terpasang dengan sumber listrik DC sehingga struktur dapat terproteksi tanpa menghabiskan anoda (inert), disebut arus paksa.

a. Proteksi Katodik Metode Anoda Korban (*Sacrificial Anode*)

Proteksi katodik dengan anoda korban (SACP) terjadi saat sebuah logam dihubungkan dengan logam yang lebih reaktif (anoda). Hubungan ini mengarah pada sebuah rangkaian galvanik. Untuk memindahkan korosi secara efektif dari struktur logam, material anoda harus mempunyai beda potensial cukup besar untuk menghasilkan arus listrik.



Gambar 2.6 Proteksi katodik dengan anoda korban (Garverick, 1994)



b. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

Untuk struktur (bangunan) yang lebih besar, anoda galvanik tidak dapat secara ekonomis mengalirkan arus yang cukup untuk melakukan perlindungan yang menyeluruh. Sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* menggunakan anoda yang dihubungkan dengan sumber arus searah (DC) yang dinamakan *cathodic protection rectifier*. Anoda untuk sistem ICCP dapat berbentuk batangan turbular atau pita panjang dari berbagai material khusus. Material ini dapat berupa *high silikon cast iron* (campuran besi dan silikon), grafit, campuran logam oksida, platina dan niobium serta material lainnya.

Tabel 2.1 Perbandingan Antara Sistem Anoda Tumbal dan Arus Paksa

Sacrificial Anode System	Impressed Current System
simple	Complex
Low/no maintenance	Require maintenance
Work best in conductives electrolyte	Can work in low conductivity electrolyte
Lower installation cost for smaller installation	Remote anodes possible
Higher capital investment for large system	Low capital investment for large system

Sumber: ASM Metal Handbook Vol. 13, 1987

2.3.3 Prinsip Proteksi katodik

Prinsip metode ini membutuhkan arus listrik DC (searah) dari sumber luar yang dihubungkan dengan logam anode dengan logam katode (logam yang dilindungi). Anode sistem ICCP ini dapat berbentuk batangan tubular dari berbagai material khusus, seperti: *high silikon cast iron*, grafit, campuran logam oksida, platina dan niobium. Metode ini biasanya digunakan untuk memproteksi fasilitas-fasilitas yang besar.

Metode ICCP harus dihubungkan dengan arus listrik DC, jika arus listriknya AC maka harus dihubungkan dengan *rectifier* (penyearah arus) karena fungsi dari sumber listrik DC ini adalah



untuk mengarahkan elektron yang teroksidasi dari anode menuju ke logam yang dilindungi sehingga logam tersebut tidak mudah untuk teroksidasi (korosi) karena kehilangan elektronnya.

Bila pipeline yang tidak diproteksi oleh *Impressed-current cathodic protection* maka *pipeline* tersebut mengalami oksidasi (kehilangan elektron) tanpa ada logam lain (anode) yang mendonasi elektron kepada pipa tersebut sehingga membuat pipeline ini mudah untuk korosi.

Pengendalian korosi dengan jalan memperlakukan struktur yang diproteksi sebagai katoda dalam suatu sel elektrokimia (NACE RP 0169-92). Dilakukan dengan cara mengalirkan arus proteksi dan elektron ke logam yang akan diproteksi, sehingga potensial logam turun ke kondisi immune. Ketiga kriteria utama proteksi katodik pada pipa baja atau besi tuang yang terpendam dalam tanah atau terbenam dalam air menurut NACE Standard adalah:

- a. -850 mV (CSE) terhadap proteksi katodik yang diaplikasikan, potensial ini dapat di ukur dengan anoda pembanding Cu-CuSO₄.
- b. Potensial polarisasi -850 mV terhadap CSE (*Copper Saturated Electrode*),
- c. Polarisasi maksimal -1700 mV.

2.4 Impressed Current Cathodic Protection

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) adalah proteksi katodik yang menggunakan sumber arus dari luar. Biasanya arus berasal dari sumber AC yang menggunakan rectifier, sehingga menjadi arus DC. Keuntungan terbesar dari sstem ICCP adalah bobot anoda yang lebih rendah dibandingkan sistem SACP, dan kekuatan drag yang lebih rendah dari laut serta hanya amembutuhkan anoda yang relatif lebih sedikit. Sistem ICCP seringkali dikombinasikan menggunakan coating. Untuk struktur (bangunan) yang lebih besar, anode galvanik tidak dapat secara ekonomis mengalirkan arus yang cukup untuk melakukan perlindungan yang menyeluruh.



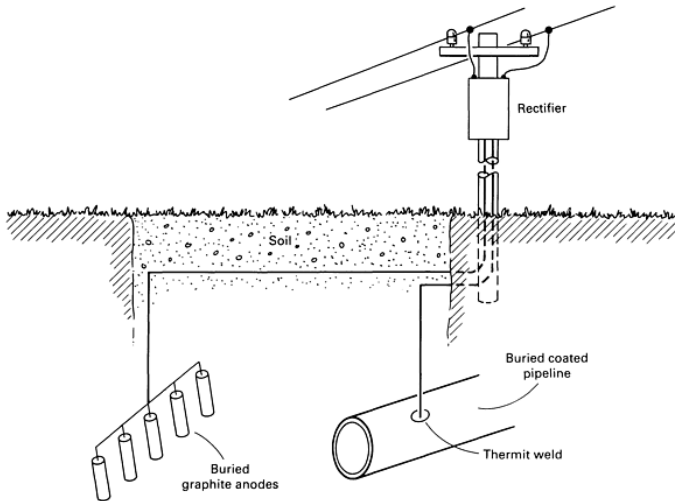
Sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* menggunakan anode yang dihubungkan dengan sumber arus searah (DC) yang dinamakan *cathodic protection rectifier*. Anode untuk sistem ICCP dapat berbentuk batangan tubular atau pita panjang dari berbagai material khusus. Material ini dapat berupa *high silikon cast iron* (campuran besi dan silikon), grafit, campuran logam oksida, platina dan niobium serta material lainnya.

Tipe sistem ICCP yang umum untuk jalur pipa terdiri dari *rectifier* bertenaga arus bolak-balok (AC) dengan output arus DC maksimum antara 10 - 50 ampere dan 50 volt. Terminal positif dari output DC tersebut dihubungkan melalui kabel ke anode-anode yang ditanam di dalam tanah. Banyak aplikasi menanam anode hingga kedalaman 60 m (200 kaki) dengan diameter lubang 25 cm (10 inci) serta ditimbun dengan *conductive coke* (material yang dapat meningkatkan performa dan umur dari anode). Sebuah kabel berkapasitas sesuai dengan arus yang timbul menghubungkan terminal negatif *rectifier* dengan jalur pipa. Output operasi yang dihasilkan dari *rectifier* diatur pada tingkat optimal oleh seorang ahli CP setelah sebelumnya melakukan berbagai pengujian termasuk diantaranya pengukuran potensial elektrokimia.

Sumber listrik AC yang paling mudah dan umum digunakan untuk system impressed current adalah Transformer rectifier. Transformer berfungsi untuk menurunkan voltase AC PLN sebesar 380 V atau 220 V menjadi voltase operasi yang dibutuhkan sedangkan rectifier berfungsi mengubah arus AC menjadi arus DC yang akan digunakan untuk proteksi katodik. Ada beberapa rectifier yang tidak mempunyai transformer tapi memanfaatkan solid state circuit untuk mengurangi power yang masuk. Jenis ini dinamakan switch mode rectifier. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika lilitan primer dihubungkan dengan sumber arus listrik bolak balik (AC) maka akan timbul fluks magnet. secara ideal semua fluks magnet bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi



sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Berikut adalah salah satu jenis rangkaian ICCP;



Gambar 2.7 Sistem proteksi ICCP pada *Pipeline* yang tertanam dalam tanah (Garverick, 1994)

Seperti yang terlihat pada gambar, anoda dan pipeline yang terhubung dengan sebuah *rectifier* elektrik, dimana memberikan suplai arus DC ke elektroda (anoda dan katoda yang terproteksi) dari sistem. Tiak seperti sistem anoda korban, sistem ICCP tidak membutuhkan secara alami anodik seperti baja. Kebanyakan anoda dari sistem ICCP menggunakan material elektroda non-consumable yang seharusnya sebagai katoda (bersifat katodik) untuk baja. Jika elektroda ini dihubungkan ke sistem, mereka akan berperan sebagai katoda dan akan menyebabkan akselerasi korosi pada struktur yang dimaksudkan. Arus DC memberikan arus bolak-balik dan memberikan peran material menjadi anoda. Bahkan pada anoda, beberapa reaksi oksidasi lain, evolusi oksigen atau klorin, terjadi pada anoda dan membuat anoda tidak terkonsumsi (inert).

Kelebihan sistem ICCP antara lain:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



1. Kapasitas output yang sangat tinggi

Jumlah arus yang dapat dirancang pada sistem bervariasi mulai dari amper yang kecil hingga ratusan ampere membuat jangkauan proteksinya lebih besar.

2. Fleksibilitas kapasitas output

Output dari sumber arus/rectifier dapat diatur dengan mudah untuk mengakomodasi perubahan tahanan sirkuit atau kebutuhan arus. Sehingga level proteksi dapat dikontrol sesuai kebutuhan.

3. Sistem yang didesain untuk masa guna lebih dari 6 tahun

4. Biaya yang lebih murah

5. Jumlah anoda yang digunakan lebih sedikit

6. Cocok untuk semua nilai resistivitas

Kekurangan sistem ICCP antara lain:

1. Resiko yang didapat relatif lebih tinggi yang dapat menyebabkan efek interferensi arus. Biasa terjadi pada struktur yang terproteksi berdekatan

2. Biaya instalasi peralatan listrik lebih mahal dan membutuhkan perlengkapan yang lebih kompleks

3. Pengaruh supply energi dari rectifier yang vital. Kerusakan sedikit saja dapat berakibat fatal pada kinerja sistem proteksi.

4. Biaya perawatan yang lebih tinggi dibandingkan sistem anoda korban.

2.5 Anoda

Anoda merupakan salah satu komponen yang paling penting dalam suatu sistem ICCP. Anoda berperan sebagai distributor arus pada struktur yang dilindungi agar arus dapat menyebar secara merata pada sistem yang dilindungi.

Jenis anoda yang digunakan pada sistem ICCP umumnya sama untuk berbagai jenis aplikasinya, baik pada pipa bawah laut, platform, maupun body kapal. Yang membedakan dari semua



aplikasi tersebut adalah bagaimana anoda itu terpasang pada masing-masing struktur yang akan diproteksi. Beberapa material yang kini sering digunakan pada sistem ICCP antara lain berupa material grafit, besituang dengan paduan silikon, mixed metal oxide, titanium dan logam-logam inert seperti platina, silver, dan emas.

Anoda adalah elektrode negatif, bisa berupa logam maupun penghantar listrik lain, pada sel elektrokimia yang terpolarisasi jika arus listrik mengalir ke dalamnya. Arus listrik mengalir berlawanan dengan arah pergerakan elektron. Pada proses elektrokimia, baik sel galvanik (baterai) maupun sel elektrolisis, anode mengalami oksidasi.

Anoda untuk metode arus paksa umumnya diklasifikasikan ke dalam 3 tipe:

1. Anoda tipe aktif (terkonsumsi cepat): besi atau baja.
2. Anoda semi pasif (semi terkonsumsi): grafit, timbal, besi-silikon.
3. Anoda pasif sempurna: terbuat dari platina.

Tabel 2.2 Jenis Anoda Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa

Bahan	Konsumsi (kg./A.t.)	Penggunaan
Platinum dan logam pelapis platinum	8.10^{-6}	Lingkungan laut
Besi Silikon Tinggi	0,25-1,0	Pipa bawah tanah
Baja	6,8-9,1	Lingkungan laut, urungan bahan karbon
Besi	9,5	Lingkungan laut, urungan bahan karbon



Besi Cor	4,5-6,8	Lingkungan laut, urungan bahan karbon
Timbal Platinum	0,09	Lingkungan laut
Timbal Perak	0,09	Lingkungan laut
Grafit	0,1-1,0	Lingkungan laut, sistem air minum, urungan bahan karbon

Sumber: ASM Metal Handbook Vol. 13, 1987

berikut adalah beberapa jenis anoda yang sering digunakan pada sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP):

1. Grafit

Grafit merupakan salah satu jenis material yang sering digunakan sebagai anoda dalam sistem ICCP. Penggunaan grafit biasanya dipasang pada cetakan resin dengan ukuran standar 65 mm x 1,2 mm dan 75 mm x 1,5 mm yang nantinya disambungkan dengan kabel. Grafit ini biasanya digunakan pada lingkungan laut, sistem air minum dan unggun bahan karbon selain itu, grafit juga memiliki densitas arus operasi yang relatif rendah yaitu 10-20 Am⁻²

2. Besi-Silikon

Besi silikon biasanya digunakan pada pipa bawah tanah untuk memproteksi pipa yang beroperasi di dalam tanah. Ukuran standar anoda jenis ini adalah 50mm x 1,2 mm dan 75 mm x 1,5 mm. Dan dihubungkan dengan kabel. Anoda jenis ini merupakan salah satu jenis besi cor dengan kandungan silikon yang tinggi yaitu sebesar 14-15% dan biasanya terdapat sedikit paduan krom.

3. Titanium dengan lapisan Platina

Anoda jenis ini biasanya digunakan pada lingkungan air laut yang memiliki kadar klorin yang tinggi. Ketahanan korosi platinum yang sangat baik dari logam platinum dan titanium yang merupakan logam inert sangat



baik bila digunakan sebagai anoda ICCP karena sangat sulit terkorosi sehingga memiliki umur pakai yang panjang. Bentuk tubular dengan diameter 3-25 mm dengan lapisan platina setebal 2,5 μm

4. Aluminium

Anoda Aluminium kadang-kadang digunakan untuk melindungi bagian interior tangki-tangki penyimpanan air. Aluminium dikonsumsi pada tingkat yang cukup tinggi sekitar 9 lbs/A-yr dalam tiap aplikasi. Keuntungan menggunakan anoda aluminium adalah biaya yang relatif murah, ringan, dan minimnya kemungkinan anoda aluminium untuk terkontaminasi oleh lingkungan yang menyebabkan menurunnya kemampuan anoda.

5. Alloyed Lead

Paduan timah perak, antimony, atau logam lainnya telah digunakan sebagai anoda untuk sistem perlindungan dalam baja katodik dengan arus paksa dalam air laut. Keuntungan utama anoda timah adalah harganya yang murah tingkat konsumsinya adalah 2-3 lbs/A-yr pada awal penggunaan, tetapi menurun menjadi sekitar 0,2lb/A-yr setelah masa pakai 2 tahun. Anoda Paduan ini tidak dapat banyak diandalkan dalam aplikasi tertentu dikarenakan gagalnya membuat lapisan pasif dan tingkat konsumsinya dan konsumsinya tetap diantara 2-3. Dan telah habis terkonsumsi. atau juga dapat menjadi sangat pasif sehingga tahanan anoda terhadap elektrolit meningkat tajam.

6. Platinum

Kawat Patina mulai sering digunakan sebagai anoda pada proteksi katodik dengan arus paksa apabila ruang yang tersedia untuk peletakan pada struktur yang sangat terbatas atau sempit. Pada dasarnya cukup tebal dan relatif memiliki ketahanan yang kuat terhadap penurunan performa pada berbagai aplikasi. Didalam air laut dengan konsumsi hanya 0,00001 lb/yr pada air laut setinggi 500 A/ft².



2.6 Lapisan Pelindung

Lapisan pelindung merupakan lapisan fil koontinyu dari material penyekat listrik di atas permukaan logam yang diproteksi. Material ini mengisolasi logam dari kontak langsung dengan elektrolit di sekelilingnya (mencegah elektrolit terhubung dengan logam) sekaligus sebagai penghalang yang memberikan hambatan listrik tinggi sehingga reaksi-reaksi elektrokimia tidak dapat terjadi. Fungsi primer lapis lindung pada pipa yang terproteksi katodik adalah mengurangi luasan permukaan logam yang terekspos pada pipa sehingga arus proteksi katodik yang diperlukan untuk melindungi logam dapat dikurang. (Peabody, 2001).

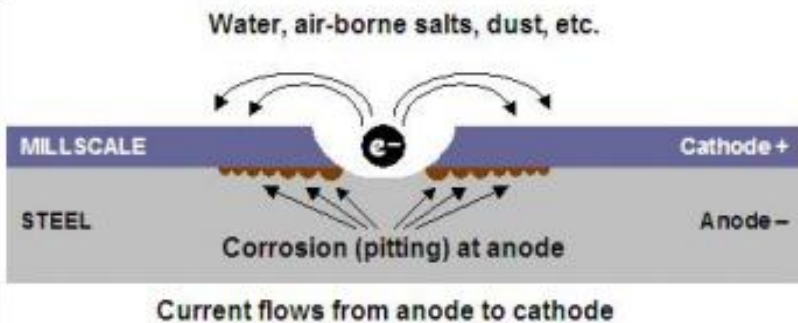
Coating Primer diterapkan langsung ke permukaan baja yang telah dibersihkan. Tujuannya adalah untuk membasahi permukaan dan untuk menyediakan adhesi yang baik untuk dilakukan coating selanjutnya. dalam kasus primer untuk permukaan baja, ini juga biasanya diperlukan untuk memberikan inhibisi korosi. (National Corrosion Service. 2000). Sedangkan Sebuah cat lapisan sekunder adalah lapisan pelindung tambahan yang diterapkan pada permukaan rawan korosi untuk memulihkan kegagalan potensi lapisan primer. Ini memberikan lapisan kedap air untuk kapal yang diberikan untuk mencegah pencemaran lingkungan atau tumpahan. (National Corrosion Service.2000)

Terdapat tahapan-tahapan dalam pelaksanaan coating. Tahapan yang pertama kali dan paling penting adalah surface preparation. Tujuan dari surface preparation ini adalah untuk menghilangkan semua kotoran dari permukaan pipa yang dapat mengganggu daya rekat coating atau dapat membuat coating terkelupas. Selain menghilangkan kotoran, surface preparation juga berfungsi untuk menghilangkan karat, millscale, surface defect seperti sisa pengelasan dan permukaan yang tajam yang dapat menyebabkan coating rusak.

Millscale adalah permukaan yang berupa serpihan yang dapat ditemukan pada besi dan baja yang diproses secara hot rolled. Mill scale terbuat dari oksida besi yang berwarna hitam kebiruan dengan ketebalan sekitar 1 mm dan terikat pada permukaan baja.



Jika millscale tidak dihilangkan namun langsung dilakukan pengcoatingan maka coating tidak akan dapat bertahan lama. Ikatan millscale pada permukaan baja tidak kuat, dan dapat dengan mudah lepas dari permukaan sehingga coating ikut terlepas dan menyebabkan partikel air masuk ke sela-sela coating. Masuknya partikel air ke sela-sela antara coating dan permukaan baja lewat millscale akan menyebabkan terjadinya korosi seragam dibawah coating sehingga dapat menyebabkan coating terkelupas lebih lebar. Fenomena ini dinamakan Millscale Induced Corrosion



Gambar 2.8 Mekanisme *Millscale Induced Corrosion* (Francis, 2005)

Terdapat beberapa jenis metode surface preparation, dan penggunaannya tergantung dari kebutuhan. Ada metode yang hanya membersihkan sisa minyak dan grease, membersihkan cat lama, pengotor, karat, millscale sampai dengan metode yang lain canggih yakni abrasive blast cleaning. Berikut metode-metode yang digunakan untuk surface preparation:

1. *Degreasing*

Degreasing adalah metode untuk menghilangkan minyak dan grease serta pengotor yang serupa dari permukaan logam dengan menggunakan larutan degreasing yang bersifat alkali. Untuk mendapatkan hasil maksimal, maka perlu diperhatikan konsentrasi larutan, temperature dan waktu perendaman atau

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



lamanya penyemprotan. Saat melakukan degreasing harus diperhatikan jangan sampai pengotor-pengotor meluas ke area logam lain. Setelah melakukan degreasing maka dilakukan pembilasan dengan air yang banyak dengan tujuan menghilangkan larutan sisa degreasing pada permukaan logam.

2. *Pickling*

Pickling adalah metode untuk menghilangkan karat dan millscale dengan cara direndam dalam larutan Asam hydrochloride (HCl), asam Sulfat (H_2SO_4) atau kombinasi antara asam hydrochloride dan asam nitrat (HNO_3). Karena perlu perendaman maka proses ini membutuhkan bak berisi larutan pickling, karena itu biasanya dilakukan di pabrik atau workshop dan dengan ukuran tertentu, tergantung ukuran baknya. Kelemahan yang lain dari metode pickling adalah limbah larutan yang beracun dan berbahaya.

Saat ini tersedia berbagai bentuk produk pickling dipasaran. Ada Pickling Gel, pickling pasta dan pickling spray. Pickling pasta lebih sering digunakan karena melekat ke permukaan logam dan tidak mudah meleleh. Pickling pasta akan menghapus semua warna hitam dan millscale pada permukaan logam dalam waktu kira-kira satu jam pada suhu 25–30°C.

Setelah proses pickling biasanya logam perlu direndam dalam larutan asam phosphate lemah untuk mencegah kekasaran lapisan permukaan pada logam dan mendapatkan organic coating yang ditandai dengan logam menjadi keabu-abuan. Setelah proses phosphating logam perlu dicuci dengan air untuk menghilangkan sisa phosphate.

3. *Manual cleaning*

Manual cleaning adalah metode yang lambat dan tidak terlalu memuaskan dalam proses surface preparation. Metode manual ini pada umumnya menggunakan chipping hammer, amplas dan sikat kawat. Penggunaan alat tersebut cukup melelahkan dan tidak dapat menghilangkan semua karat dan millscale yang ada. Manual cleaning hanya dapat digunakan pada



kondisi – kondisi tertentu misalnya adanya cuaca buruk atau factor lain yang tidak bisa digunakan metode surface preparation lainnya.

4. Power Tool Cleaning

Power tool cleaning adalah metode yang lebih cepat dibandingkan dengan manual cleaning namun tetap membutuhkan tenaga kerja dan cukup mahal biayanya. Tool yang umum digunakan adalah Needle gun yaitu tool yang terdiri dari jarum-jarum baja yang berputar dan bergetar membersihkan permukaan dari kotoran-kotoran. Tool ini cocok untuk digunakan membersihkan logam disekitar baut. Kelemahan dari needle gun adalah menyebabkan efek seperti terbakar pada permukaan. Tool lain yang dapat digunakan untuk surface preparation adalah gerinda, linisher dan sanders.

5. High or Ultra High Pressure Water Jetting

High atau Ultra High Pressure Water Jetting adalah metode menggunakan air bertekanan dengan kecepatan tinggi yang disemprotkan ke permukaan logam. Metode ini digunakan pada pekerjaan pemeliharaan untuk menghilangkan karat dan cat lama. Metode ini juga dapat menghilangkan kandungan garam pada permukaan logam yang biasanya berdampak pada kerusakan dini pada coating. Kelemahan metode ini adalah lambat dan membuat sekitarnya basah serta tidak bisa diaplikasikan pada logam baru.

The Steel Structures Painting Council (SSPC) mengkategorikan empat jenis teknologi yang menggunakan metode water jetting ini yaitu:

- Low Pressure Water Cleaning (LPWC) dengan tekanan air dibawah 5000 Psi (34 MPa)
- High Pressure Water Cleaning (HPWC) dengan tekanan air 5000 – 10.000 Psi (34 – 70 MPa)
- High Pressure Water Jetting (HPWJ) dengan tekanan air 10.000 – 25.000 Psi (70 – 170) Mpa
- Ultra High Pressure Water Jetting (UHPWJ) dengan tekanan air diatas 25.000 Psi (170 Mpa).



6. *Blast Cleaning*

Blast cleaning adalah metode abrasive surface preparation dengan cara menghantarkan cleaning material langsung ke permukaan logam dengan semburan kuat energy mekanik. Blasting menggunakan udara adalah metode blasting yang paling umum digunakan. Selain itu material yang digunakan bisa bermacam-macam tergantung permukaannya, diantaranya adalah kawat kecil, silicon carbide, ice, biji kenari, glass, baking soda, sand dan pasir besi. Derajat kebersihan dan kekasaran permukaan tergantung dari karakteristik material yang digunakan. Ice dan Sand adalah material yang umum digunakan.

Sandblasting yang dilakukan pada udara terbuka cukup membahayakan bagi pekerja dikarenakan adanya material yang terbang dan sesak napas dikarenakan debu yang terhisap. Debu silica yang terbentuk saat proses sandblasting dapat menyebabkan efek silicosis. Karena itu beberapa Negara mengatur penggunaan sandblasting yaitu harus dilaksanakan dalam lingkungan yang terkontrol dengan ventilasi, pakaian proteksi khusus dan tabung udara untuk bernafas.

Menurut NACE Standards RP0169-96 Section 5, lapis lindung sebagai sarana pengendali korosi yang efektif memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Penyekat listrik yang efektif
2. Penghalang uap (kelembapan) efektif
3. Mampu diaplikasikan
4. Sejalan dengan waktu mampu menahan perkembangan *holidays*
5. Memiliki adhesi yang baik terhadap permukaan pipa
6. Mampu menahan kerusakan akibat perawatan normal, penyimpanan (degradasi sinar ultra violet), dan pemasangan
7. Sejalan dengan waktu, mampu memelihara tahanan jenis listrik secara konstan
8. Ketahanan terhadap *disbonding*
9. Mudah diperbaiki



10. Interaksi dengan lingkungan tidak menghasilkan zat beracun

2.7 Potensial Proteksi dan Elektroda Acuan

Kriteria potensial proteksi katodik -850 mV atau disebut juga on potensial sudah menjadi perdebatan bertahun – tahun antara para enjineer dan industriawan di bidang korosi. Kriteria ini terus berubah hingga akhirnya NACE mengeluarkan Standard Practice NACE SP 0169 pada tahun 2007 yang mengakomodir 3 nilai criteria potensial proteksi katodik. Kriteria itu antara lain sebagai berikut.

1. Nilai negative potensial proteksi katodik tidak boleh kurang dari -850 mV saat proteksi katodik diaplikasikan. Nilai potensial proteksi ini diukur dengan menggunakan elektroda standard Cu/CUSO₄ dengan mempertimbangkan adanya voltage drop untuk mendapatkan pengukuran yang akurat.

Mempertimbangkan adanya voltage drop adalah dengan cara sebagai berikut:

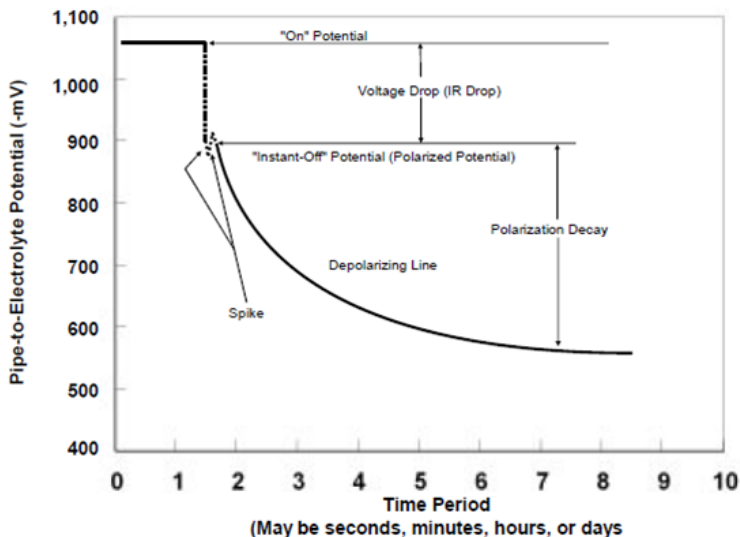
- Mengukur atau menghitung nilai voltage drop
- Review historical dari system proteksi katodik pada struktur tersebut
- Melakukan evaluasi terhadap karakteristik physical dan electrical dari pipa dan lingkungan tersebut.
- Mengamati ada atau tidaknya aktivitas korosi pada struktur tersebut

2. Nilai negative polarized potential tidak boleh kurang dari -850 mV yang diukur menggunakan elektroda standard Cu/CUSO₄. Polarized potensial adalah jumlah antara potensial korosi (potensial natural pipa) dengan sisa polarisasi.

3. Nilai polarisasi minimum adalah -100 mV antara permukaan struktur dan elektroda standard yang kontak dengan elektrolit.

untuk lebih jelasnya dapat melihat gambar berikut ini:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



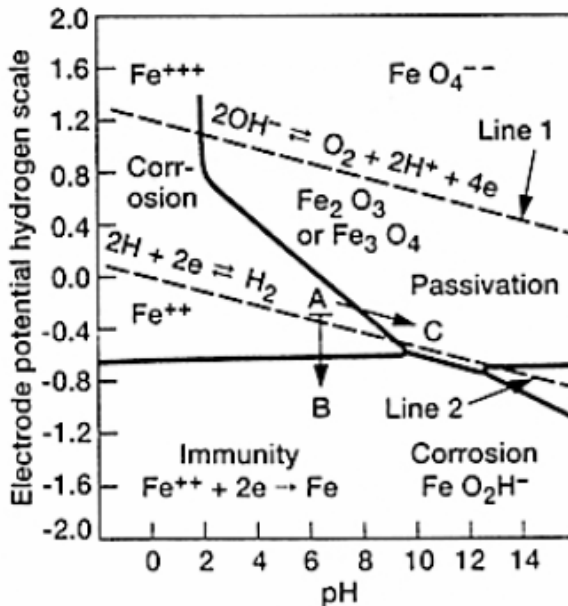
Gambar 2.9 *Pipe to Electrolyte Potential* (Gummow, 2010)

Nilai kriteria potensial proteksi katodik “on Potential” -850 mV diperkenalkan oleh Robert J. Kuhn pada sebuah paper tahun 1933 berdasarkan pengalamannya melakukan instalasi proteksi katodik untuk pipa air di New Orleans Amerika Serikat pada tahun 1920. Judul paper tersebut adalah “Cathodic Protection of Underground Pipe Lines from Soil Corrosion”. Nilai -850 mV untuk pipa air di daerah New Orleans masuk akal melihat kondisi air tanah yang berlimpah, tahanan tanah yang rendah dan kedalaman pipa yang dangkal.

Tetapi nilai potensial proteksi -850 mV ternyata tidak bisa mengakomodir proteksi katodik untuk kondisi tanah diluar New Orleans, pada tahun 1950 Kuhn menggunakan nilai -1000 mV untuk pipa gas yang dicoating di daerah Texas Amerika Serikat. Perubahan nilai kriteria potensial proteksi katodik yang signifikan ini menjadi pertanda tidak cukupnya nilai -850 mV (on Potential)



Penelitian mengenai criteria potensial proteksi juga dilakukan oleh Pourbaix pada tahun 1974 dalam jurnalnya yang berjudul “Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions” Penelitian beliau mengenai korelasi antara PH dan nilai potensial proteksi. Berdasarkan persamaan Nerst, Pourbaix membuat grafik mengenai hubungan antara pH dan potensial proteksi katodik sebagai berikut;



Gambar 2.10 *Electrode Potential Hydrogen Scale* (Leeds, 2008)

Elektroda standard yang digunakan adalah elektroda hydrogen dan nilai criteria potensial proteksi minimal yang digunakan sebesar $-0,59 \text{ V SHE}$ atau jika dikonversi menjadi $-0,9 \text{ V}$ dengan elektroda Cu/CuSO_4 . Nilai ini lebih negative -50 mV dari hasil eksperimen Kuhn.

Maksud dari grafik pourbaix ini adalah terdapat 3 lokasi yaitu:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



- A (daerah korosi dimana terjadi proses korosi pada struktur logam didaerah ini)
- B (Daerah imun, atau lebih dikenal dengan proteksi katodik)
- C (daerah Passivasi atau daerah proteksi anodic)

Maksud dari pourbaik mengatakan bahwa potensial proteksi minimum adalah -0,59 V SHE atau -900 mV CSE adalah membawa sebuah logam yang semula berada daerah korosi (daerah A) menuju daerah immunity (Daerah B) sehingga proses korosi berhenti.

Untuk memudahkan pembacaan maka pourbaix menyusun sebuah tabel pada suhu 25 oC dan tekanan 1 atm untuk PH 1 sampai dengan 14 sebagai berikut:

Tabel 2.3 Tabel Pourbaix pada suhu 25°C untuk pH 1-14

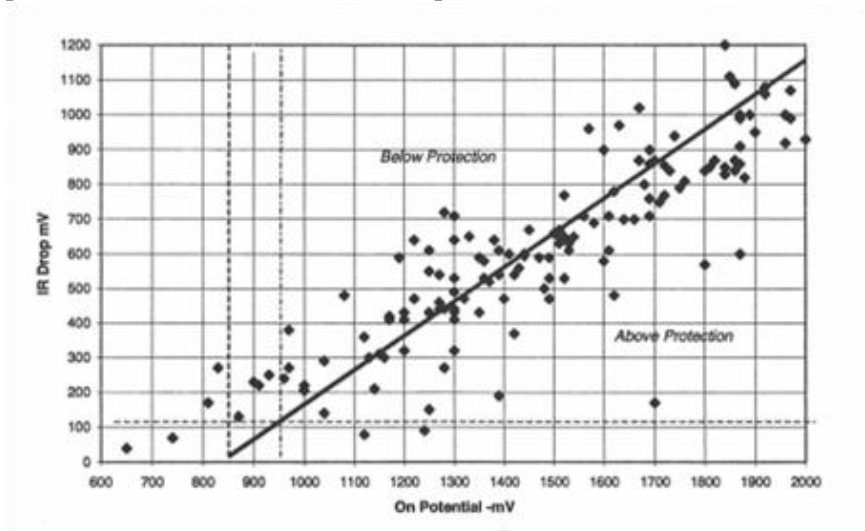
Electrolyte pH	Oxygen Reduction Potential (V)	Water Reduction Potential (V)	Iron Immunity Potential (V)	Difference Between Oxygen Reduction & Iron Immunity (V)	Difference Between Water Reduction & Iron Immunity (V)
1	1.1689	-0.0591	-0.626	-1.7949	-0.5669
2	1.1098	-0.1182	-0.62	-1.7298	-0.5018
3	1.0507	-0.1773	-0.62	-1.6707	-0.4427
4	0.9916	-0.2364	-0.62	-1.6116	-0.3836
5	0.9325	-0.2955	-0.62	-1.5525	-0.3245
6	0.8734	-0.3546	-0.62	-1.4934	-0.2654
7	0.8143	-0.4137	-0.62	-1.4343	-0.2063
8	0.7552	-0.4728	-0.62	-1.3752	-0.1472
9	0.6961	-0.5319	-0.62	-1.3161	-0.0881
10	0.637	-0.591	-0.67	-1.307	-0.079
11	0.5579	-0.6501	-0.729	-1.3069	-0.0789
12	0.5188	-0.7092	-0.788	-1.3068	-0.0788
13	0.4597	-0.7683	-0.847	-1.3067	-0.0787
14	0.4006	-0.8274	-1.263	-1.6636	-0.4356

Nilai praktis terdapat pada kolom iron immunity potential dimana untuk setiap pH maka batas minimal sebuah besi masuk daerah imun adalah berdasarkan nilai potensial proteksi yang tertera di kolom tersebut pada skala SHE, Untuk mendapatkan nilai pada skala CSE harus ditambahkan -316 mV. Sebagai contoh pada



pH 7 di tabel tersebut tertulis nilai -0.62 V SHE maka dikonversi menjadi -0.936 V CSE.

Dikarenakan ketidak pastian pada criteria -850 mV on potential ini, maka banyak perusahaan mengaplikasikan nilai yang lebih negative dari -850 mV dengan variasi -900 mV, -950 mV bahkan sampai -1000 mV. Namun berdasarkan penelitian Brian Holtsbaum dalam sebuah jurnal yang berjudul “Use of Historical IR drops for Interpretation of “ON” Potential Criterion” pada tahun 2000 menyatakan bahwa nilai variasi tersebut tidak bisa mengakomodir nilai criteria minimal negative polarized potential proteksi berdasarkan criteria NACE point 2.



Gambar 2.11 Grafik IR Drop Potensial (Leeds, 2008)

Dalam grafik tersebut masih banyak terlihat bahwa struktur masih berada dibawah ambang proteksi, walaupun nilai potensial yang diberikan sudah mencapai nilai -2000 mV sekalipun, terkait adanya IR drop yang terjadi.

Besarnya IR drop yang disampaikan oleh Holtsbaum dinilai tidak biasa, karena itu pada tahun 1990 yang dipublikasikan dalam

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



jurnalnya yang berjudul “Measurement of IR-Drop Free Pipe-to-Soil Potentials on Buried Pipelines”, Thompson dan Beaver melakukan penelitian terhadap 115 lokasi di Amerika dan mendapatkan kesimpulan sebagai berikut:

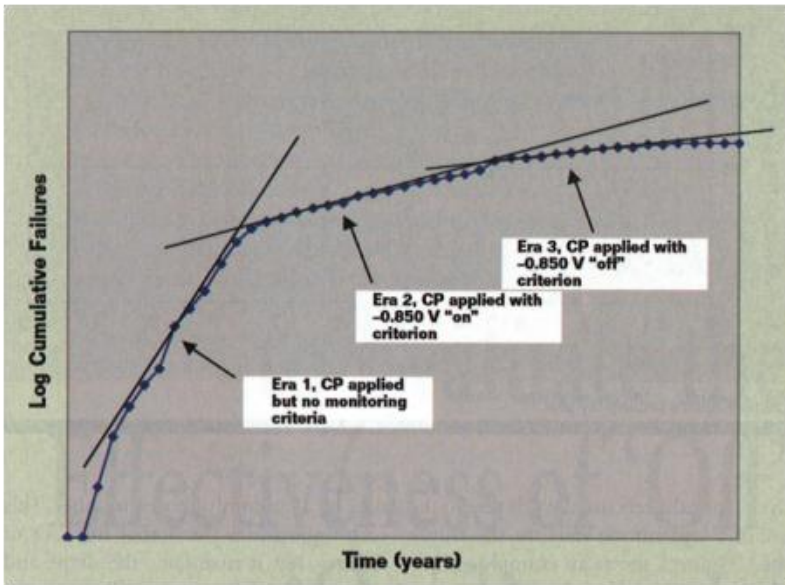
1. Terdapat 64 % lokasi test point yang mempunyai IR drop lebih besar atau sama dengan 30 % nilai on potentialnya
2. Terdapat 19 % lokasi test point dengan IR drop lebih besar atau sama dengan 10 % nilai on potentialnya.

Dikarenakan nilai IR drop sangat ekstrim untuk pipa dengan coating, maka nilai kriteria proteksi on potential tidak bisa dijadikan satu-satunya acuan. Harus mengakomodir parameter lainnya.

Kriteria lain yang berkembang adalah nilai polarized potential -850 mV atau yang dikenal dengan off potential yang pertama kali diperkenalkan oleh Schwerdtfeger and McDorman pada tahun 1950 dalam jurnalnya yang berjudul “Potential and Current Requirements for the Cathodic Protection of steel in Soils” berdasarkan penelitian nilai potensial proteksi pada besi baja untuk pH 2,9 sampai dengan 9.6 mereka menyatakan bahwa potensial korosi dan pH bersentuhan dengan garis hydrogen pada nilai 0.77 V SCE (standard Calomel Electrode) atau -850 mV CSE.

Maksud dari potensial bersentuhan dengan hydrogen adalah tidak ada perbedaan potensial antara anoda dan katoda yang berarti tidak terjadi reaksi korosi.

Mark Matter dalam sebuah jurnalnya yang berjudul “Using Failure Probability Plots to Evaluate the effectiveness of “Off” vs. “On” Potential CP Criteria” pada tahun 2004 merupakan studi yang paling lengkap menyajikan data mengenai kedua kriteria -850 mV ini. Berdasarkan data selama 50 tahun dari pipa transmisi yang sangat besar dan sangat panjang, beliau membuat grafik mengenai pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kerusakan akibat korosi yang ditimbulkan setelah mengaplikasikan -850 mV off potential.



Gambar 2.12 Log Cumulative Failure (Leeds, 2008)

Kesimpulan dari grafik tersebut adalah nilai potensial polarisasi -850 mV atau nilai off potensial dapat menurunkan kegagalan akibat korosi hingga lima kali lipat.

Derajat proteksi ditentukan oleh potensial struktur logam terhadap media elektrolit terhadap medi elektronik yang ada, bukan ditentukan oleh besarnya arus. Kriteria proteksi yang umum diterapkan pada pipa baja adalah memiliki beda potensial -850 mV terhadap elektroda references Cu/CuSO_4 dalam media elektrolit aerobik. Apabila beda potensial terlalu negatif, perlindungan yang diharapkan justru akan merusak.

British Standard Institute (BSI) Code of Practice For Cathodic Protection memberikan nilai-nilai tegangan perlindungan logam terhadap elektrolit yang diukur terhadap bermacam-macam elektroda referens. Berikut adalah tabel nilai elektroda referens.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Tabel 2.4 Nilai Elektroda Acuan

Elektrode Reference	Lingkungan Aerobik	Lingkungan Anaerobic
Cu/CuSO ₄	-0.85 mV	-0.95 mV
Ag/AgCl Air Laut	-0.80 mV	-0.90 mV
Ag/AgCl Jenuh	-0.75 mV	-0.85 mV
Zn/ Air Laut	+0.25 mV	+0.15 mV

Sumber: BS 7361 Part 1 Cathodic Protection. Part 1 Code of Practice for Marine and Land Application

2.8 Rancangan Perhitungan

1. Luas Permukaan

Luas Permukaan yang diproteksi Luas permukaan yang diproteksi yaitu luas permukaan pipa yang kontak langsung dengan tanah. Perhitungan luas permukaan luar dapat diperoleh dengan melibatkan diameter luar pipa yaitu dan keseluruhan panjang untuk pipa yang digunakan. Penentuan luas permukaan yang akan diproteksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus persamaan (1).

Dalam sistem proteksi katodik arus paksa, densitas arus merupakan fungsi dari nilai tahanan jenis tanah rata-rata hasil pengukuran. Nilai tersebut disesuaikan dengan tingkat kekorosifan tanah yang dilalui pipa. Tipe tanah ini selanjutnya menentukan densitas arus pada suatu nilai potensial perlindungan. Nilai ini dapat dilihat pada table dibawah

Tabel 2.5 Klasifikasi Resistivitas Tanah

Rentang Resistivitas (Ohm.cm)	Klasifikasi Resistivitas	Antisipasi aktivitas korosi
0-2.000	Rendah	Sangat Tinggi
2.000-10.000	Sedang	Tinggi
10.000-30.000	Tinggi	Sedang
>30.000	Sangat Tinggi	Rendah

Sumber: A.Sulaiman, Karyanto H.1992 “Corrosion control dan Monitoring”, Jakarta: Workshop Pertamina.



Faktor keamanan turut dilibatkan dalam perhitungan untuk memberikan penyesuaian terhadap penambahan luas permukaan karena adanya suaian (fitting), lengkungan (bending) dan lain sebagainya.

2. Konduktansi Lapis Lindung Pipa

Untuk menentukan konduktansi lapis lindung pipa, terlebih dahulu diketahui nilai tahanan lapis lindung pipa dimana disini digunakan coaltar enamel yang menurut bukuhandbook of cathodic corrosion protection oleh Von Baeckmann mempunyai tahanan sebesar 30.000 ohm-m², dari buku tersebut juga dapat diambil rumus perhitungan yang seperti terdapat pada persamaan (2).

3. Tahanan Pipa

Dari data yang didasarkan pada buku Peabody halaman 79, didapatkan tahanan spesifik pipa yang mempunyai diameter 2 inch atau 0,0508 meter adalah 79.2×10^{-6} ohmmeter. Dalam menentukan tahanan pipa yang akan diproteksi, menggunakan tebal pipa sebesar 0,0064 meter. Maka dapat digunakan rumus persamaan (3).

4. Konstanta Attenuasi

Berdasarkan referensi dari buku Examples of design for cathodic protection system oleh Peabody, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan konstanta attenuasi atau kelipatan pertambahan tahanan pipa, dengan menghitung akar dari perkalian tahanan pipa dan konduktansi lapis lindung pipa yang telah dihitung sebelumnya, atau dengan menggunakan persamaan (4).

5. Tahanan Karakteristik Pipa

Untuk Berdasarkan referensi dari buku Examples of design for cathodic protection system oleh Peabody, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan tahanan pipa yang telah diproteksi oleh lapis lindung atau tahanan karakteristik pipa, yang dihitung dengan mengakarkan pembagian tahanan pipa dengan konduktansi lapis lindung pipa, atau dapat juga menggunakan rumus persamaan (5).



6. Pergeseran Potensial Pipa

Berdasarkan referensi dari buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody pada halaman 15, didapatkan rumus perhitungan untuk mendapatkan potensial perlindungan pipa dari sistem anoda sampai ujung pipa yang telah direncanakan akan diproteksi, dengan memasukkan potensial proteksi minimal yaitu $-0,85$ volt, lalu dimasukkan juga jarak yang akan dihitung yang telah dikalikan dengan konstanta attenuasi yang telah dihitung sebelumnya, dan dapat pula menggunakan rumus persamaan (6).

7. Kebutuhan Arus Proteksi

Berdasarkan buku *Examples of design for cathodic protection system* oleh Peabody chapter 11, dapat dihitung kebutuhan arus awal yang diperlukan untuk melindungi pipa dari serangan korosi, dengan membagi pergeseran potensial pipa dengan tahanan karakteristik pipa, yang dapat ditentukan melalui persamaan (7).

8. Keperluan Arus DC minimum

Dari referensi buku *Corrosion* oleh L.L Shreir didapatkan perumusan untuk menentukan berapa arus searah (DC) minimum yang dibutuhkan untuk memproteksi pipa. Sebelumnya harus diketahui dulu kebutuhan arus proteksi (I_o) yaitu $0,17$ ampere dan memasukkan safety faktor, maka dapat digunakan pula perhitungan pada persamaan (8).

9. Berat Anoda

Dengan memasukkan desain lama proteksi yaitu 20 tahun, laju konsumsi anoda yang terdapat pada buku peabody halaman 169 dan arus IR yang digunakan maka dapat ditentukan berat anoda yang dibutuhkan. Dari rumus yang didasarkan pada buku *Cathodic Protection* oleh Uhlig halaman 1072 didapatkan perumusan untuk mendapatkan total berat anoda yang dibutuhkan untuk melindungi struktur selama waktu desain, yang dapat dihitung menggunakan persamaan (9).

Faktor guna mengidentifikasi fungsi anoda diasumsikan hanya digunakan sebesar 80 % dari total berat anoda. Dengan



tujuan agar rancangan lebih aman dimana arus proteksi anoda memenuhi kebutuhan proteksi selama waktu desain.

10. Jumlah Anoda yang Dibutuhkan

Setelah mendapatkan berat anoda total yang dibutuhkan, untuk menentukan jumlah anoda yang sesuai dan mencukupi untuk dilakukan proteksi katodik arus paksa pada pipa terlebih dahulu harus diketahui berat 1 buah anoda yaitu 21 Kg dan safety factor yang digunakan. Untuk mendapatkan jumlah anoda yang dibutuhkan dapat menggunakan perhitungan persamaan (10).

2.9 Survey Resistivitas Tanah

Resistivitas tanah adalah ukuran dari kemampuan tanah untuk memperlambat konduksi dari arus listrik .

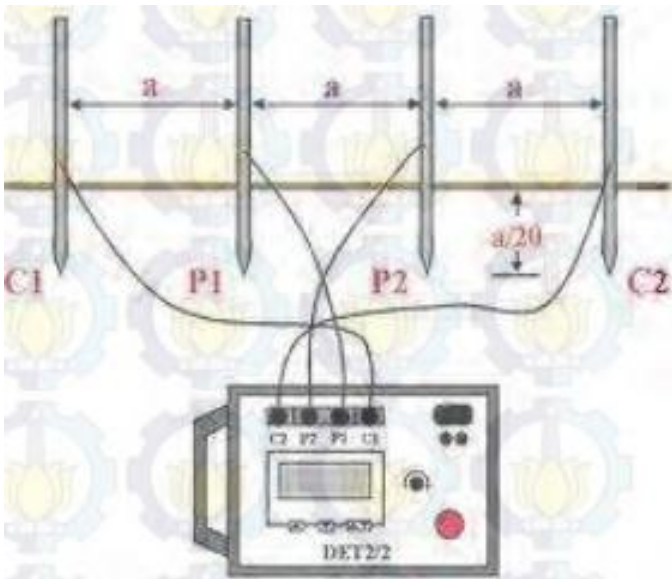
Listrik resistivitas tanah dapat mempengaruhi laju korosi galvanik struktur logam dalam kontak dengan tanah. Tinggi kadar air atau meningkat elektrolit konsentrasi dapat menurunkan resistivitas dan meningkatkan konduktivitas sehingga meningkatkan laju korosi. Tanah resistivitas nilai-nilai biasanya berkisar dari sekitar $2-1000 \Omega \cdot m$, tetapi nilai-nilai yang lebih ekstrim yang tidak biasa.

Tujuan survei tahanan jenis tanah dengan menggunakan metode Wenner adalah:

- a. Mengetahui tingkat korosi masingmasing lingkungan tanah yang dilalui struktur
- b. Menentukan besar densitas arus yang diperlukan pada perhitungan total arus proteksi,
- c. Menentukan lokasi penempatan anoda dengan tepat, sehingga diperoleh proteksi yang maksimal terhadap struktur.

Adapun prosedur pengukurannya sebagai berikut:

- a. Memasukkan empat pin baja ke dalam tanah pada jarak yang tetap dalam satu garis lurus. Selanjutnya hubungkan masing-masing pin pada instrumen pengukur seperti gambar berikut:



Gambar 2.13 Konfigurasi metode Wenner (Saputra, 2010)

Jarak antar pin dapat ditentukan menggunakan meteran. Jarak ini mewakili pengukuran tahanan jenis dari kedalaman elektrolit dengan variasi 1.5; 3 dan 6 meter.

- b. Dua pin terluar (C1 dan C2) merupakan elektrode arus, sedang dua pin pada bagian dalam (P1 dan P2) merupakan elektrode potensial yang mengukur penurunan potensial karena adanya hambatan dari elektrolit (tanah) ketika arus AC dilewatkan diantara pin-pin terluar.
- c. Mengukur nilai hambatan secara langsung pada instrumen Megger dan menghitung nilai tahanan jenisnya sesuai persamaan berikut

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

dengan:

ρ = tahanan jenis tanah (Ohm-cm)

a = jarak antar pin (cm)

R = hambatan yang terukur (Ohm)



$$\Pi = 3.14$$

d. Harus diperhatikan bahwa pengukuran yang dilakukan dengan cara ini menunjukkan nilai rata-rata tahanan jenis tanah pada kedalaman tertentu terkait dengan jarak antara pin-pin yang berdekatan. Kedalaman pin (electrode) tidak boleh melebihi nilai $a/20$.

Hasil survei ini berupa nilai tahanan jenis tanah yang menggambarkan tingkat korosifitas dari lokasi tanah yang akan menjadi media elektrolit. Sehingga perencanaan jenis anoda tumbal yang digunakan akan menyesuaikan dengan hasil survei ini.

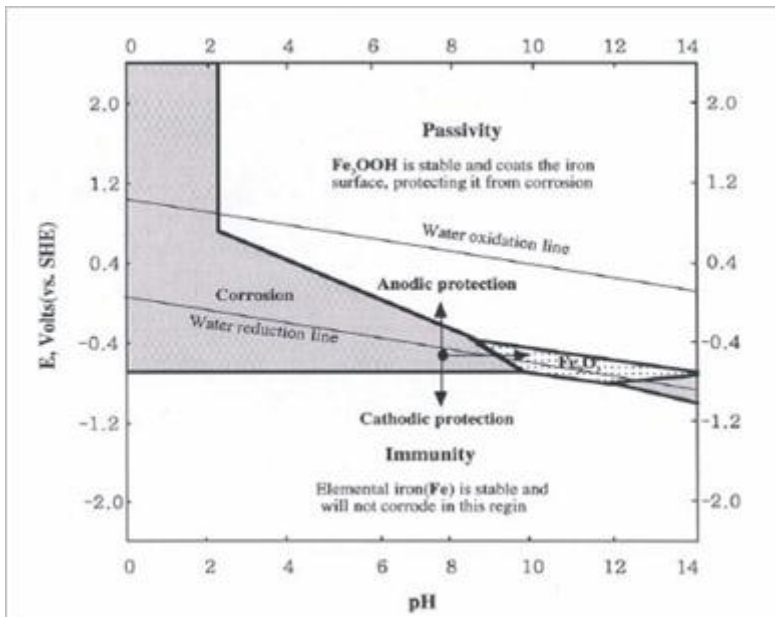
2.10 Diagram Pourbaix

Diagram potensial-pH atau diagram Pourbaix memetakan fasa-fasa stabil logam dan senyawanya dalam larutan dengan pelarut air, yang berada dalam kesetimbangan termodinamika, sebagai fungsi dari potensial elektroda dan pH larutan. Dalam diagram potensial pH untuk besi terdapat zona korosi, yaitu daerah reaksi pelarutan besi yang terletak dalam daerah asam dan di daerah sempit pada kondisi sangat basa; zona pasif, yaitu daerah terbentuknya selaput tak larut di permukaan logam yang menghalangi proses korosi lebih lanjut; dan zona kebal, yaitu daerah yang secara termodinamika keadaan sebagai logam adalah fasa paling stabil. Gambar 1 memperlihatkan diagram Pourbaix sederhana untuk besi pada keadaan standar pada suhu 25 °C.

Kegunaan diagram Pourbaix terutama adalah untuk;

1. memperkirakan arah reaksi spontan;
2. komposisi produk korosi; dan
3. perubahan lingkungan yang akan mencegah atau menurunkan laju serangan korosi.

Diagram Pourbaix adalah diagram yang menggambarkan keadaan suatu bahan dengan potensial tertentu dalam derajat keasaman (pH) tertentu. Sumbu vertikal menunjukkan potensial bahan, sedangkan sumbu horisontal menunjukkan pH. Potensial (E) mengacu pada elektroda standar hidrogen yang dihitung dengan menggunakan persamaan Nernst.



Gambar 2.14 Diagram Pourbaix (Peeabody 2001)

Dapat dilihat pada diagram pourbaix Fe, pada potensi lebih positif dari -0.6 dan pada pH sekitar di bawah 9, ion besi (Fe^{2+}) adalah zat yang stabil. Hal ini menunjukkan bahwa besi akan terkorosi pada kondisi ini. Di daerah lain dari diagram ini, dapat dilihat bahwa korosi besi menghasilkan ion besi (Fe^{3+}), hidroksida besi [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], hidroksida besi [$\text{Fe}(\text{OH})_2$], dan pada kondisi yang sangat alkali menghasilkan ion kompleks HFeO_2^- . Pada pH diatas 10, besi akan mengalami 3 kondisi, yaitu: pasifasi antara oksidasi Fe menjadi Fe_2O_3 , pasifasi antara oksidasi Fe menjadi Fe_3O_4 , dan kondisi stabil yang berada di daerah imun. Ketahanan Fe pada kondisi tinggi diakibatkan oleh munculnya selaput pasif protektif (Fe_2O_3 dan Fe_3O_4) yang menghalangi terjadinya korosi lebih lanjut pada besi.



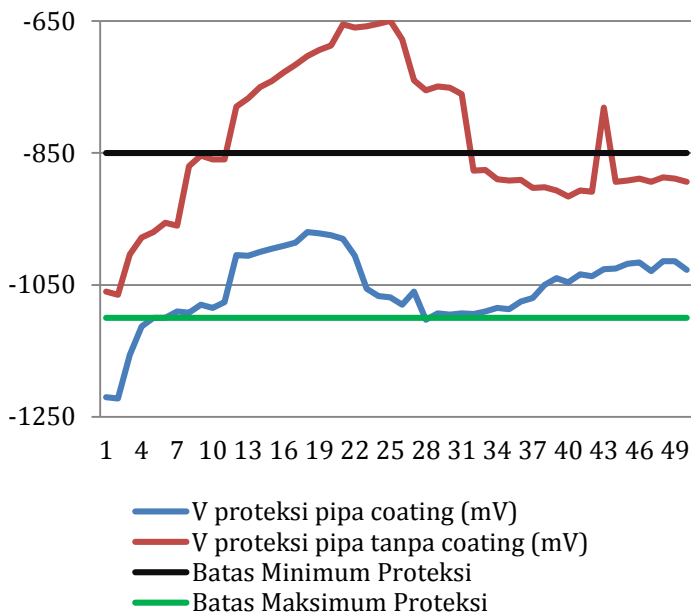
2.11 Penelitian Sebelumnya

Pada Penelitian sebelumnya yang dilakukan berkaitan tentang Proteksi katodik pipa dengan sistem proteksi katodik anoda tumbal yang dilakukan oleh Sepriananda dengan tipe API 5L Grade B dalam media tanah pada tahun 2016 dalam media tanah dengan variasi coating dan non coating. Pipa yang ditanam dalam tanah harus memiliki potensial sebesar -850 sampai -1100 mv agar terhindar dari korosi eksternal. Apabila pipa yang ditanam memiliki potensial kurang dari nilai tersebut maka perlu dilakukan proteksi katodik untuk mencapai nilai tersebut. Pengukuran potensial pipa dapat diketahui dengan menggunakan elektroda referensi Cu/CuSO₄ yang dihubungkan ke kutub negatif multimeter dan test point yang dihubungkan ke kutub positif multimeter.

. Derajat proteksi ditentukan oleh potensial struktur logam terhadap media elektrolit terhadap medi elektronik yang ada, bukan ditentukan oleh besarnya arus. Kriteria proteksi yang umum diterapkan pada pipa baja adalah memiliki beda potensial -850mV terhadap elektroda references Cu/CuSO₄ dalam media elektrolit aerobik. Apabila beda potensial terlalu negatif, perlindungan yang diharapkan justru akan merusak. Bila potensial melebihi -1100mV maka katoda akan ter over proteksi.

Dari grafik terlihat dari hari ke-1 hingga ke-50 nilai proteksi terpenuhi sesuai standar yang terlihat. Untuk yang coating terlihat data material lebih tinggi dari yang tidak di coating. Hal ini terjadi karena pipa dan anoda masih dalam kondisi penyesuaian dengan lingkungan. Namun seiring berjalan waktu dan pengontrolan arus yang dilakukan pipa coating dapat terus terjaga pada range proteksi. Jika dibandingkan dengan pipa coating yang mendapat proteksi yang berasal dari lapisan coating dan arus dari anoda korban sementara pipa tanpa coating hanya berasal dari arus anoda korban hal tersebut akan sangat mempengaruhi potensial proteksi dari pipa. Dapat disimpulkan pipa coating lebih mudah dikontrol untuk terus berada di zona proteksi, sementara pada pipa tanpa coating pengontrolan arus harus lebih diperhatikan.

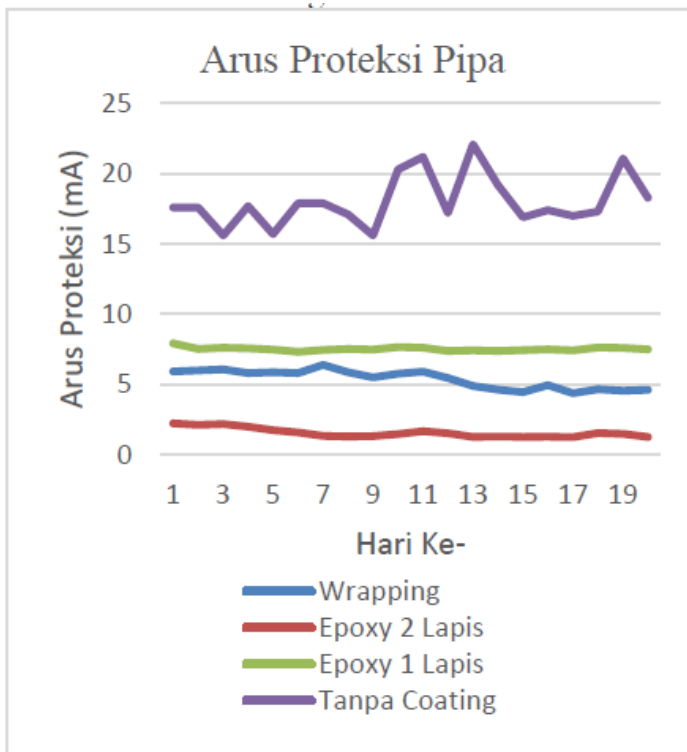
BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.15 Grafik Arus proteksi pipa (Sepridany, 2016)

Dapat disimpulkan juga bahwa dari hasil pengujian selama 50 hari, pipa yang dikenai coating hanya membutuhkan arus proteksi yang lebih sedikit dibandingkan dengan pipa yang tidak dikenai coating. Adanya coating pada pipa membuat pipa lebih terproteksi dan membutuhkan arus kecil kisaran 0.9 mA sampai 1.5 mA dibandingkan dengan pipa yang tidak dikenai coating, pipa membutuhkan arus proteksi sekitar 3.6 sampai 5 mA. (Sepridany, 2016).

Pada Penelitian lain yang dilakukan oleh Tubagus Noor R, dkk dalam Jurnal Ilmiah Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 VOLUME V, OKTOBER 2016 berjudul “Perancangan Proteksi Arus Paksa Pada Pipa Baja Api 5l Dengan Coating Dan Tanpa Coating Di Dalam Tanah”.



Gambar 2.16 Arus Proteksi Pipa dengan Variasi Coating
(Tubagus, 2016)

Dapat dilihat dari percobaan dengan Arus paksa, pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 20mA dan memiliki nilai arus proteksi yang paling besar, sementara pipa dengan wrapping dan epoxy memiliki arus proteksi yang lebih rendah. Yaitu 8 mA pada pipa epoxy satu lapis, 5 mA pada pipa wrapping, dan 3mA pada pipa epoxy 2 lapis.

Dari hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa coating dapat memberi pengaruh yang signifikan terhadap kebutuhan arus proteksi. Semakin rapat lapisan pelindung yang diberikan, maka akan membuat kebutuhan arus proteksi semakin

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



kecil. Hal ini dapat dimana coating dua lapis memiliki arus proteksi yang paling kecil, disusul pipa wrapping, dan terakhir pipa dngan epoxy satu lapis.



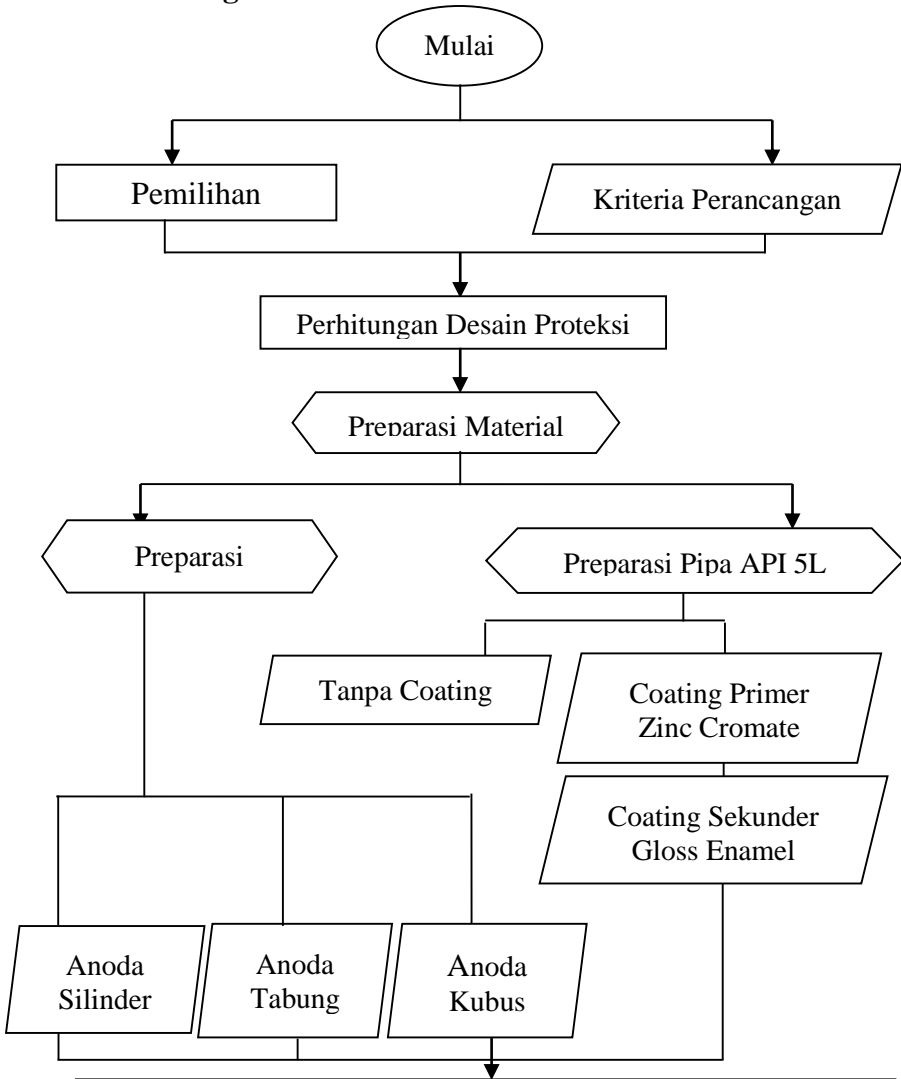
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

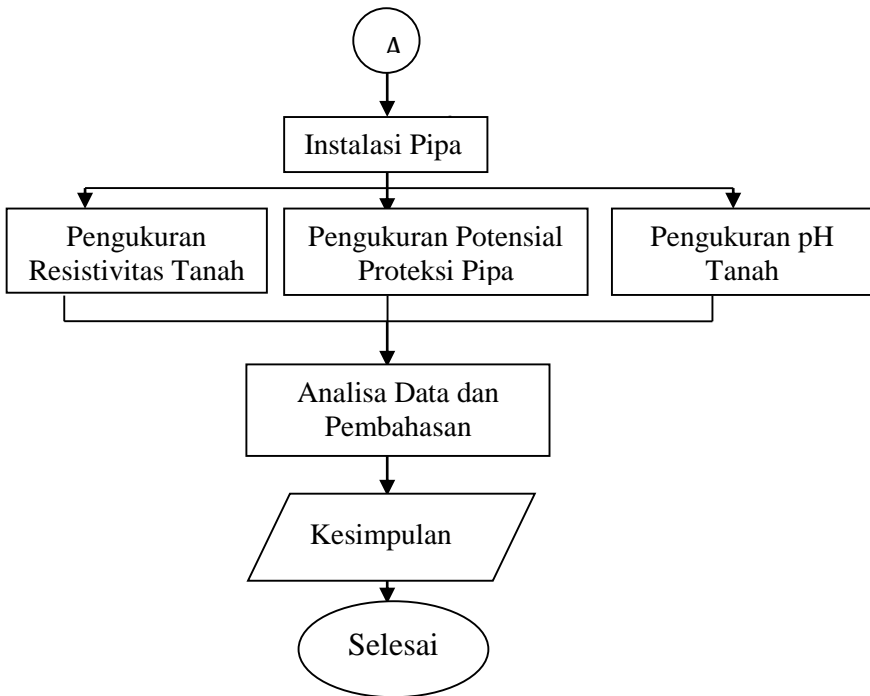
BAB II TINJAUAN PUSTAKA



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan *coating* primer dan *coating* sekunder dan tanpa *coating* di dalam tanah adalah pipa baja API 5L Grade B, anoda grafit dengan tiga macam bentuk, kabel tembaga dengan berdiamter 2.5 mm, serta cat *coating* primer *zinc chromate* dan cat sekunder *gloss enamel*.

1. Pipa Baja API 5L Grade B



Gambar 3.2 Pipa Baja API 5L Grade B

2. Anoda Grafit



Gambar 3.3 Anoda Grafit Berbentuk Silinder



3. Cat Coating Primer dan Sekunder



Gambar 3.4 Cat Coating Primer dan Sekunder

4. Kabel Tembaga



Gambar 3.5 Kabel Tembaga 2.5 mm

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa Pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan *Coating* Primer dan *Coating* Sekunder di dalam tanah yaitu:

1. *Transformator Rectifier*



Gambar 3.6 *Transformator Rectifier*

2. *Electrode Reference Cu//CuSO₄*



Gambar 3.7 Elektroda Refference Cu/CuSO₄



3. Kabel tembaga
4. Multitester



Gambar 3.8 Avometer

3.4 Langkah Perancangan

Langkah-langkah yang digunakan untuk mendukung perancangan tersebut antara lain,

1. Pengumpulan data
2. Melakukan kriteria desain
Kriteria Desain yang digunakan adalah
Umur desain: 2 tahun
Limit positif: -850 mV
Limit negatif: -1100 mV
Elecrode Reference: Cu/CuSO₄

3. Standart perancangan
Desain sistem proteksi katodik arus paksa mengikuti standar:
 - NACE Standart SP-0169-2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System

- NACE Standart RP-0286-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines
 - DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design
 - A. W. Peabody, Control of Pipeline Corrosion (Second Edition), NACE International The Corrosion Society
4. Pengujian resistivitas tanah
- Pengujian dan pengukuran resistivitas tanah mengikuti standart ASTM G57 Standart Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using The Wenner Four – Electrode Methode



Gambar 3.9 Alat pengujian Resistivitas Tanah Metode Wenner

5. Pengujian pH tanah
- Pengujian dan pengukuran pH tanah mengikuti SOP Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standart Operation Procedure pH Soil Determination.
6. Desain proteksi arus paksa
- Untuk mengetahui arus dan tegangan yang diperlukan. Maka perhitungan dimulai dengan:
1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi
$$A = \pi \times D \times L \quad (1)$$



Dengan :

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

2. Konduktansi Lapis Pelindung

$$g = (\pi \times D) / \omega \quad (2)$$

Dengan :

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m-1)

D = diameter luar pipa (m)

ω = tahanan lapis lindung pipa (ohm-m²)

$\pi = 3,14$

3. Tahanan Pipa

$$r = P_{\text{pipa}} / (\pi t (D-t)) \quad (3)$$

Dengan :

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

P_{pipa} = tahanan spesifik pipa (ohm-m)

t = tebal pipa (m)

D = diameter luar pipa (m)

4. Konstanta Atenuasi

$$\alpha = \sqrt{(r \times g)} \quad (4)$$

Dengan :

α = konstanta attenuasi (ohm-m-1)

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m-1)

5. Tahanan Karakteristik Pipa

$$r_p = \sqrt{(r/g)} \quad (5)$$

Dengan :

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

r = tahanan pipa (ohm-m-1)

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m-1)

6. Pergeseran Potensial Pipa

$$E_o = E \times \cosh\left(\frac{L}{r_p}\right) \times \alpha \quad (6)$$

Dengan :

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)



E = pergeseran potensial pipa minimum (volt)

α = konstanta attenuasi

L = jarak pipa terproteksi (m)

7. Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_o = E_o / r_p \times \tanh[\alpha \times L] \quad (7)$$

Dengan :

I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

α = konstanta attenuasi

8. Keperluan Arus DC Minimum

$$I_R \geq I_o \times S_f \quad (8)$$

Dengan :

I_R = keperluan arus DC minimum (ampere)

I_o = keperluan arus proteksi (ampere)

9. Berat Anoda

$$W_o = (Y \times C \times I_R) / U \quad (9)$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)

Y = lama proteksi (tahun)

C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)

I_R = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)

7. Instalasi peralatan

a. Preparasi Pipa

Pipa yang digunakan adalah pipa baja API 5L grade B sebanyak 6 buah, pengukuran pipa digunakan agar dapat mengetahui luas permukaan yang akan dilindungi. Dari pengukuran didapat panjang sebesar 150 cm, diameter pipa sebesar 5,08 cm, dan tebal pipa sebesar 0,64 cm. Kemudian pipa juga dibersihkan dari pengotor yang menempel dan diberikan pengait kabel yang dilas pada permukaan kabel, agar pemasangan kabel menjadi lebih mudah.



Gambar 3.10 Pengait kabel pada pipa

b. Pemberian Coating

Pipa dibagi menjadi dua, 3 buah pipa tanpa coating dan 3 buah pipa yang dilapisi oleh cat coating untuk pelapisan. Cat coating berupa cat primer dan cat sekunder.

c. Preparasi anoda

Anoda yang digunakan adalah anoda grafit sebanyak 6 buah. Anoda grafit dibagi menjadi tiga dimensi masing-masing dua buah. Dimensi pertama berbentuk silinder panjang dengan tinggi 10 cm dan diameter 3,81 cm, Dimensi kedua berbentuk silinder pendek dengan tinggi 6 cm dan lebar 3 cm, dimensi ketiga berbentuk kubus dengan panjang 7cm, tinggi 7 cm, dan lebar 2.3 cm. Bagian atas dari anoda kemudian sedikit dilubangi sebagai tempat sambungan kabel, Anoda kemudian diberikan backfill yang berasal dari serbuk grafit.



Gambar 3.11 Anoda dengan tiga bentuk yang berbeda; a) bentuk kotak; b) bentuk silinder pendek; c) bentuk silinder panjang

d. Instalasi Pipa

Pipa kemudian dikaitkan kabel pada tempat pengait yang sudah dilas pada pipa, kabel yang digunakan adalah kabel tembaga sehingga menghantarkan listrik dengan baik. Kabel yang berasal dari pipa dihubungkan dengan kutub negative dari rectifier, sementara kabel yang berasal dari anoda dihubungkan menuju kutub positif rectifier.

e. Penanaman pipa dan anoda

Pipa dan anoda ditanam di dalam tanah hingga kedalaman sekitar 50 cm dengan jarak antara anoda dengan pipa adalah 20 cm.



Gambar 3.12 Penanaman Pipa



Gambar 3.13 Penanaman Anoda

f. Pemberian arus proteksi

Setelah pipa dan anoda tertanam, rectifier dinyalakan dan tegangan dari rectifier diatur hingga pipa terproteksi

8. Pengujian tegangan proteksi

Pengujian yang dilakukan adalah menguji apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk kedalam area proteksi yaitu sekitar -850 mV sampai dengan -1100 mV



Gambar 3.14 Pengujian Tegangan Proteksi



9. Analisa hasil

Analisa yang dilakukan adalah melihat bagaimana pengaruh lingkungan dalam hal ini resistivitas tanah dan pH memengaruhi keperluan arus proteksi.

10. Evaluasi

Evaluasi yang dilakukan adalah dengan melihat hasil pipa yang telah diberikan proteksi katodik arus paksa selama selang waktu yang telah ditentukan dan melihat anoda yang digunakan dalam proteksi arus paksa.

11. Kesimpulan

Sistem proteksi katodik arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B dinyatakan berhasil apabila tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk ke dalam area proteksi yang sudah ditentukan dan tidak terjadi kegagalan pada sistem proteksi tersebut



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Perancangan

4.1.1 Kriteria Desain

Perancangan proteksi katodik pada desain dilakukan dengan menerapkan kriteria desain, yaitu:

- Umur Desain: 2 tahun
- Limit Positif: -850 mV
- Limit Negatif: - 1100mV

4.1.2 Standar Desain Perancangan

Standar yang digunakan pada Desain mengacu pada:

- NACE RP-B401
“Cathodic Protection Design”
- ASTM G-57
“Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner Four- Electrode Method”
- NACE SP-0169-2013
“Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System”
- NACE RP-0286-97
“Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines”
- NACE RP-0169
“Standard Practice Control of External Corrosion”
- NACE RP-0177
“Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems”

4.2 Pengumpulan Data

4.2.1 Data Material

Material pipa : Baja karbon rendah
Jenis Pipa : Seamless pipe API 5L Grade B
Panjang pipa : 1.5 meter



Diameter luar : 0.0508 m
 Tahanan jenis baja : 2.2×10^{-7} Ohm-m
 Tebal dinding : 0.0064 m
 Kedalaman pipa dari permukaan tanah : 0.5 m
 Anoda : Grafit

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja API 5L Grade B

Unsur	Komposisi (max)
Karbon (C)	0,22%
Mangan (M)	1,20%
Posfor (P)	0,025%
Sulfur (S)	0,015%
Titanium (Ti)	0,04%
Vanadium (V)	0,15%
Nikel (Ni)	0,15%

Sumber: Specification for Line Pipe American Petroleum Institute, 2004

Tabel 4.2 Spesifikasi Anoda

Material Anoda	Aplikasi Khusus	Typical Loss (Lb/ A.Y)
Grafit	Tanah, air tawar	0.25-5.0

Sumber: Supomo, 1995

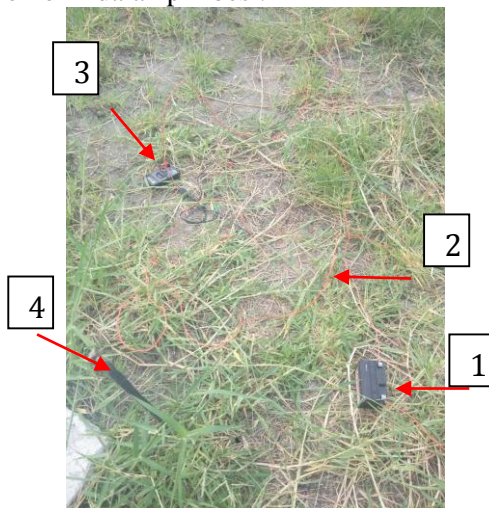
4.2.2 Data Lapis Lindung

Pada penelitian ini, pipa akan diberi dua perlakuan yang berbeda. Pipa pertama akan diberi perlakuan tanpa coating. Sedangkan pipa kedua akan diberi perlakuan cat coating dua lapis, yaitu pipa yang dilapisi coating primer dan sekunder (Sintetic enamel dan high gloss enamel). Cat yang digunakan adalah cat high-cromate dan cat besi. Dalam perencanaan proteksi katodik, lapis lindung diasumsikan mengalami penurunan kualitas selama masa pakainya.

4.2.3 Data Tanah

4.2.3.1 Pengukuran Resistivitas Tanah

Pengujian resistivitas tanah dilakukan secara konvensional dengan menggunakan standar ASTM G 57-58. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar resistansi tanah dalam menghantarkan aliran listrik dan mengelompokkan tanah menjadi beberapa bagian sesuai dengan tingkat korosifitasnya. Pada gambar dibawah, terlihat pengukuran resistivitas tanah dimana nomor 1 adalah aki, nomor 2 adalah kabel tembaga, nomor 3 adalah avometer, nomor 4 adalah pin besi.



Gambar 4.1 Pengujian Resistivitas Tanah

Prinsip dari metode *Wenner Four-Pins Method* adalah memberikan suplai arus AC pada pin-pin terluar dan secara simultan mengukur penurunan tegangan di antara pin-pin bagian dalam akibat timbulnya tahanan pada elektrolit. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan dengan kedalaman dan jarak yang berbeda untuk mendapatkan nilai tanah yang menyeluruh. Jarak dan kedalaman yang digunakan pada pengukuran ini adalah jarak (a1) 200 cm, kedalaman (d1) 10 cm, dan (a2) 400 cm, (d2) 10 cm.



Pengukuran resistivitas tanah dilakukan setiap hari selama total 40 hari, kemudian nilai tahanan jenis dihitung sesuai rumus berikut,

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R$$

Dengan

ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-cm)

π = 3.14

a = Jarak antar pin (cm)

R = Hambatan yang terukur (ohm)

Hasil pengukuran berada di bagian lampiran, sehingga untuk rata-rata dari pengukuran adalah

$$\rho_{\text{rata-rata}} = \sum \rho / N$$

Dimana:

$\sum \rho$ = Jumlah hasil pengukuran tahanan

N = Jumlah pengukuran yang dilakukan

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah Pada Pipa Tanpa Coating

Hari ke-	Nilai Resistivitas	Hari ke-	Nilai Resistivitas
1	196,873	11	150,101
2	156,975	12	145,355
3	135,124	13	130,263
4	145,654	14	158,246
5	167,873	15	170,111
6	170,761	16	144,676
7	155,538	17	165,842
8	160,483	18	155,048
9	159,894	19	159,229
10	156,334	20	136,413
Rata-rata			156,039



Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah Pada Pipa Coating Dua Lapis

Hari ke-	Nilai Resistivitas	Hari ke-	Nilai Resistivitas
1	141,641	11	144,045
2	146,413	12	138,446
3	148,572	13	132,346
4	142,048	14	141,115
5	144,302	15	138,797
6	141,887	16	145,370
7	142,318	17	144,917
8	146,594	18	142,225
9	93,2338	19	155,354
10	149,217	20	142,615
Rata-rata			141,073

Pengukuran tanah dilakukan setiap hari selama kegiatan penelitian berlangsung. Pada hari terakhir, data kemudian diolah hingga mendapat nilai rata-rata resistivitas sebesar 156.039 ohm.cm. selama 20 hari penanaman pipa tanpa coating dengan range fluktuatif antara 130-196 Ohm.cm. Nilai resistivitas tanah terbesar terjadi pada hari ke-1 sebesar 196.87 Ohm.cm dan nilai resistivitas tanah terkecil terjadi pada hari ke-13 sebesar 130.23 Ohm.cm. peningkatan terbesar terjadi pada hari ke-15 yaitu sebesar 12 Ohm.cm.

Sementara pada penelitian pipa coating sekunder, pengukuran tanah dilakukan setiap hari selama kegiatan penelitian berlangsung. Pada hari terakhir, data kemudian diolah hingga mendapat nilai rata-rata resistivitas sebesar 141.073 ohm.cm. selama 20 hari penanaman pipa tanpa coating dengan range fluktuatif antara 93-155 Ohm.cm. Nilai resistivitas tanah terbesar terjadi pada hari ke-19 sebesar 155,534 Ohm.cm dan nilai resistivitas tanah terkecil terjadi pada hari ke-8 sebesar 93.23 Ohm.cm. peningkatan terbesar terjadi pada hari ke-19 yaitu sebesar 13 Ohm.cm.



Melihat data diatas, tanah tempat penelitian tergolong tanah korosif dengan jenis tanah yang sedikit lempung akibat hujan. Dengan melihat nilai resistivitas tanah yang ada, perancangan proteksi katodik arus paksa ini setidaknya menjadi acuan apapenyebab terjadinya perubahan proteksi. Nilai resistivitas atau kelembaban tanah mempengaruhi besar arus proteksi yang digunakan untuk memproteksi pipa, saat resistivitas tanah menurun kondisi tanah menjadi lebih lembab sehingga memerlukan arus proteksi yang lebih besar, sementara saat resistivitas tanah meningkat atau kelembaban berkurang arus proteksi yang diperlukan akan menurun. Perubahan resistivitas tanah dapat disebabkan beberapa hal seperti temperatur, serta kondisi lingkungan seperti lingkungan hujan atau kering. Resisvitas tanah merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi sistem perancangan proteksi katodik ICCP.

4.2.3.2 Pengukuran pH Tanah

Pengujian pH tanah dilakukan sesuai dengan Standart Operasional Procedure (SOP) Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standart Operation Procedure pH Soil Determination. Langkah Metode SERAS antara lain adalah; Sampel tanah kering diambil sebesar 10 gram, kemudian diberi air sebanyak 10 mL. Sample tersebut kemudian diaduk agar tercampur dan dibiarkan sekitar 1 jam. Setelah itu sampel tanah diukur dengan pH meter yang sebelumnya telah dikalibrasi dengan larutan buffer (pH 7).

Pengujian pH tanah dilakukan setiap hari selama total 40 hari agar dapat mengetahui perkembangan kondisi pH tanah. Dari hasil pengujian pH tanah yang terlihat dari tabel dapat dilihat bahwa kondisi pH tanah cenderung stabil dibesaran sekitar 8.2

Pengujian pH tanah dilakukan untuk mengetahui apakah kandungan tanah memiliki karakteristik asam, basa, atau netral karena hal tersebut dapat mempengaruhi sifat tanah yang dapat pula mempengaruhi kebutuhan arus proteksi untuk pipa katoda.



Tabel 4.5 Hasil pengukuran pH Pada Pipa Tanpa Coating

Hari Ke-	pH	Hari Ke-	pH
1	8,4	11	8
2	8,1	12	7,8
3	8	13	7,9
4	8,1	14	8,2
5	8,3	15	8
6	8,4	16	8,3
7	8,2	17	8,3
8	8,4	18	8,2
9	8,3	19	8,4
10	8,4	20	8,3
Rata-rata			8.2

Tabel 4.6 Hasil pengukuran pH Pada Pipa Coating Dua Lapis

Hari Ke-	Ph	Hari Ke-	pH
1	7,9	11	8,4
2	8,6	12	7,8
3	7,9	13	7,8
4	8	14	8,3
5	8,3	15	8,5
6	8,4	16	8
7	8,2	17	8,3
8	7,6	18	8
9	8	19	7,9
10	8,6	20	8,3
Rata-rata			8.14

Dari tabel diatas, pada penelitian pipa tanpa coating, dapat dilihat bahwa kondisi pH selama 20 hari cenderung fluktuatif namun tetap stabil antara 7.8 hingga 8.4 dengan pH rata-rata sebesar 8.2. sementara pada penelitian pipa coating primer dan sekunder, dapat dilihat bahwa kondisi pH selama 20 hari cenderung fluktuatif namun tetap stabil antara 7.6 hingga 8.6 dengan pH rata-



rata sebesar 8.14. Dari hasil tersebut, perubahan pH tidak terlalu signifikan mendandakan kondisi tanah cenderung netral tidak terlalu basa atau terlalu asam. Perubahan pH tanah yang fluktuatif biasanya disebabkan oleh kondisi tanah cenderung berubah-ubah sesuai lingkungannya. Pengaruh pH dalam perancangan ini tidak dapat menjadi suatu acuan apakah pH tanah yang ada mempengaruhi perancangan dan kebutuhan arus yang diperlukan dalam perancangan proteksi arus paksa. Bila pH semakin asam, maka cenderung membutuhkan arus yang lebih tinggi begitu pula sebaliknya. Hal ini disebabkan bahwa tanah yang cenderung asam lebih bersifat korosif dibanding tanah yang cenderung basa. pH tanah merupakan salah satu faktor yang menentukan kebutuhan arus proteksi sistem ICCP.

4.3 Perhitungan Desain

Perhitungan desain dilakukan menggunakan standar *NACE RP-B401 "Cathodic Protection Design"* untuk mendapatkan nilai yang diharapkan dalam pengujian sistem proteksi sesuai dengan standar yang berlaku sehingga ketika dalam perancangan pipa berhasil terproteksi sesuai nilai standar. Perhitungan dilakukan secara manual.

4.3.1 Luas permukaan yang diproteksi

Pada pipa yang ditanam dalam tanah, luas permukaan yang hendak dilindungi adalah luas permukaan pipa yang mengalami kontak langsung dengan tanah. Perhitungan luas permukaan luar dihitung berdasarkan diameter pipa (D) dan panjang pipa (L) panjang pipa diketahui 1.5 meter sedangkan diameter pipa diketahui sebesar 2 inch atau 0.0508 m. Perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut;

Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$A = \pi \times D \times L$$

Dengan

D = diameter luar pipa (m)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

$$\begin{aligned} A &= \pi \times D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0508 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \\ &= 0.239268 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4.3.2 Kebutuhan Arus Proteksi

Arus perlindungan total yang diperlukan untuk melindungi pipa dihitung sesuai rumus berikut:

Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_o = \frac{A \times CD \times CB}{1000} \times (Sf)$$

Dengan:

A = Luas permukaan

I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)

CD = densitas arus paksa pada temperatur kerja (mA/m²)

CB = Faktor breakdown Coating

Sf = Safety factor (1,25)

1. Pipa Tanpa Coating

a. Kebutuhan Arus Proteksi

$$\begin{aligned} I_o &= (\tan \alpha \times E_o \times L) / r_p \\ &= \frac{\tan 0,0376 \times 0,675477 \times 1,5}{2,358954} \\ &= 0,016154401 \text{ A} \\ &= 16,154401 \text{ mA} \end{aligned}$$

b. Keperluan Arus DC Minimum

$$\begin{aligned} IR &\geq I_o \times Sf \\ IR &\geq 16,154401 \times 1.25 \\ IR &\geq 20,1930012 \text{ mA} \end{aligned}$$

2. Pipa Coating Primer dan Sekunder

$$a. I_o = (A \times CD \times CB \times Sf) / 1000$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.239268 \times 20 \times 0.035}{1000} \times (1.25) \\
 &= 0.0002093595 \text{ A} \\
 &= 0.2093595 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

b. Keperluan Arus DC Minimum

$$\begin{aligned}
 IR &\geq I_o \times Sf \\
 IR &\geq 0.2093595 \times 1.25 \\
 IR &\geq 0.26169938 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Dalam sistem ICCP, densitas arus merupakan fungsi dari nilai tahanan jenis tanah rata-rata hasil pengukuran. Nilai tersebut disesuaikan dengan tingkat kekorosifan tanah yang dilalui pipa. Tipe tanah ini selanjutnya menentukan densitas arus yang dibutuhkan untuk mempolarisasikan pipa pada suatu nilai potensial perlindungan.

faktor keamanan (*Sf*) turut dilibatkan dalam perhitungan untuk memberikan penyesuaian terhadap penambahan luas permukaan karena adanya suaian (*fitting*), lengkungan (*bending*) dan lain sebagainya.

Dalam perencanaan, lapis lindung diasumsikan mengalami penurunan kualitas selama masa pakainya. Pada kasus ini, tingkat kerusakannya sepuluh persen per tahun.

4.3.3 Kebutuhan Anoda

Penggunaan Anoda perlu digunakan secara efektif guna menghemat biaya dan mendapatkan proteksi yang maksimal. Selain itu, Berat anoda dapat diukur sesuai dengan lama proteksi. Pada penelitian ini lama proteksi selama 2 tahun dengan laju konsumsi anoda sebesar 2 kg/A per tahun. Rumus menghitung berat anoda adalah sebagai berikut;

Berat Anoda

$$W_o = (Y \times C \times IR) / U$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)



Y = lama proteksi (tahun)

C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)

IR = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)

Jumlah Anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{W_o}{W} \times Sf$$

Dengan:

n = jumlah anoda

W_o = berat anoda total (Kg)

W = berat anoda standar (Kg)

1. Pipa Tanpa Coating

a. Berat Anoda

$$\begin{aligned} W_o &= (Y \times C \times IR) / U \\ &= \frac{2 \times 2 \times 0,0201930012}{80\%} \\ &= 0,100965006\text{kg} \end{aligned}$$

b. Jumlah Anoda

$$\begin{aligned} n &= (W_o / W) \times Sf \\ &= \frac{0,100965006}{0,2} \times 1,25 \\ &= 0,63103 \rightarrow 1 \text{ buah} \end{aligned}$$

2. Pipa Coating Primer dan Sekunder

a. Berat Anoda

$$\begin{aligned} W_o &= (Y \times C \times IR) / U \\ &= \frac{2 \times 2 \times 0,00026169938}{80\%} \\ &= 0,001308496946\text{kg} \end{aligned}$$

b. Jumlah Anoda

$$\begin{aligned} n &= (W_o / W) \times Sf \\ &= \frac{0,001308496946}{0,2} \times 1,25 \end{aligned}$$



$$= 0.008178 \rightarrow 1 \text{ buah}$$

Berat keseluruhan anoda yang dibutuhkan adalah 71 gram. Sementara produk anoda yang tersedia di pasaran mempunyai berat minimal sebesar 0.2 kg. Jadi hanya dibutuhkan 1 anoda masing-masing pipa.

4.4 Perhitungan Arus dan Potensial

Pengujian arus tegangan dilakukan secara berkala setiap hari selama 20 hari pengujian. Pengujian arus dan tegangan proteksi dilakukan untuk mengetahui tegangan dan arus sistem proteksi yang dikeluarkan oleh rectifier sudah berjalan sesuai standar area proteksi yaitu sekitar -850 mV sampai -1100mV dengan menggunakan electrode Cu/CuSO₄ sebagai reference. Pengujian dilakukan dengan menggunakan avometer yang disambungkan kepada electrode reference dan test point, test point yang berasal dari kabel yang terhubung dengan pipa kemudian dihubungkan dengan avometer yang telah disambungkan dengan electrode reference Cu/CuSO₄ dan kedalam tanah sehingga tegangan dapat diukur dan terbaca. Pipa terlebih dahulu diukur potensialnya sebelum dilakukan pengujian guna mengetahui seberapa besar potensial pipa yang telah ditanam dan sebelum diberi proteksi arus paksa. Gambar dibawah adalah perhitungan potensial proteksi dimana nomor 1 adalah elektroda acuan sedangkan nomor 2 adalah kabel tembaga yang menghantarkan arus. Pengujian arus proteksi juga dilakukan secara berkala setiap hari selama 20 hari pengujian menggunakan Avometer. Avometer dihubungkan secara seri pada kabel yang berasal dari kutub positif rectifier yang menyambung ke katoda sehingga arus yang keluar dari rectifier dapat terbaca hingga satuan miliamper (mA). Arus yang keluar dipengaruhi oleh tegangan potensial yang mengalir dari rectifier dan berada di area *range* proteksi. Sehingga semakin besar potensial maka akan semakin besar arus. Pengujian tersebut dilakukan dan dikontrol setiap hari selama total 40 hari.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.2 Pengujian Potensial Pipa

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Tanpa Coating Sebelum Proteksi

Bentuk Anoda	Potensial Pipa (mV)
Bentuk Kubus	-665
Bentuk Silinder Panjang	-792
Bentuk Silinder Pendek	-702

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Coating Primer dan Sekunder Sebelum Proteksi

Bentuk Anoda	Potensial Pipa (mV)
Bentuk Kubus	-676
Bentuk Silinder Panjang	-664
Bentuk Silinder Pendek	-583

Dimana dalam setiap hari perkembangan proteksi dilakukan dengan mengontrol tegangan dan arus yang diperlukan untuk memproteksi pipa sehingga tidak terjadi over proteksi atau kurang proteksi. Pengukuran arus dan tegangan dicatat kemudian diolah menjadi data menggunakan komputer.



Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder panjang

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	15,2	11	20
2	14,8	12	20,7
3	15	13	20,9
4	15,9	14	20,7
5	14,82	15	19,9
6	17,4	16	22
7	29,2	17	21,8
8	26	18	23,5
9	24,8	19	21,4
10	25	20	22,6
Rata-rata			20,581

Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder Pendek

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	24,3	11	22,3
2	22,7	12	22,7
3	17,1	13	22,5
4	20,5	14	21,8
5	23,5	15	21,4
6	27,9	16	25,6
7	30,2	17	23,7
8	29,7	18	26,7
9	25,8	19	23,5
10	24,6	20	26,3
Rata-rata			24,140



Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Kubus

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	8,2	11	19,7
2	13,2	12	19,8
3	14	13	20,1
4	14,6	14	18,7
5	10,7	15	18,7
6	16,5	16	20,4
7	28,1	17	20,2
8	24,7	18	21
9	22,6	19	19,5
10	23,4	20	21,6
Rata-rata		18,785	

Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Panjang

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	4,98	11	10,2
2	6,92	12	6,47
3	4,73	13	8,59
4	5,98	14	8,39
5	5,14	15	9,55
6	5,84	16	10,87
7	4,71	17	11,86
8	4,92	18	13,74
9	11,02	19	8,7
10	11,43	20	9,23
Rata-rata		8,163	

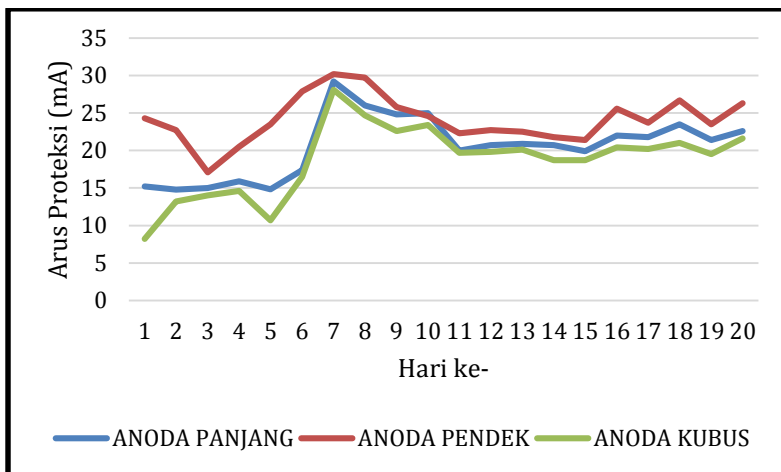


Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Pendek

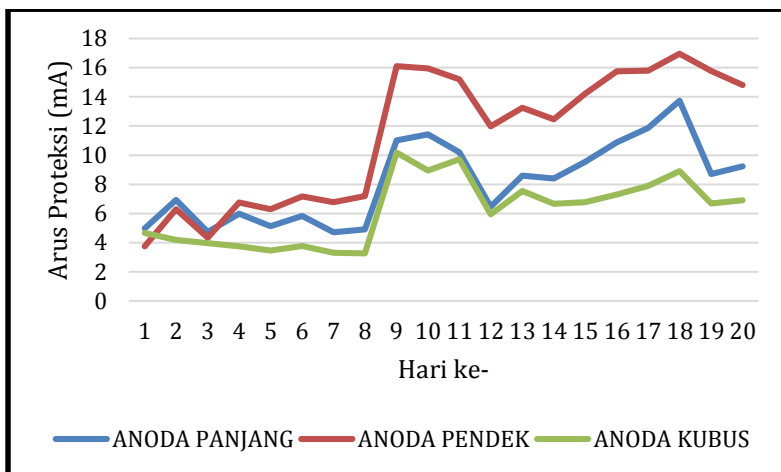
Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	3,75	11	15,2
2	6,3	12	11,97
3	4,34	13	13,26
4	6,75	14	12,45
5	6,29	15	14,22
6	7,17	16	15,76
7	6,78	17	15,8
8	7,2	18	16,95
9	16,1	19	15,78
10	15,96	20	14,8
Rata-rata			11,342

Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Kubus

Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke-	Arus Proteksi (mA)
1	4,66	11	9,71
2	4,18	12	5,95
3	3,96	13	7,55
4	3,74	14	6,67
5	3,47	15	6,78
6	3,77	16	7,3
7	3,32	17	7,9
8	3,27	18	8,9
9	10,17	19	6,7
10	8,94	20	6,9
Rata-rata			6,192



Gambar 4.3 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating



Gambar 4.4 Grafik Kebutuhan Arus Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder

Dari tabel pengujian di atas dapat diketahui bahwa pengaruh coating sangat mempengaruhi arus yang dibutuhkan



untuk memproteksi pipa. Pada pipa yang dicoating primer membutuhkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan pipa yang dicoating ganda (Primer dan Sekunder). Dimensi anoda juga mempengaruhi efektivitas pengeluaran arus proteksi pipa. Pada dua tipe pipa yang diproteksi, pipa yang memiliki anoda kubus membutuhkan arus proteksi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan pipa yang memiliki anoda silinder panjang maupun silinder pendek.

Pada hari pertama penanaman pipa tanpa coating, ketiga pipa membutuhkan arus yang lebih besar yaitu 15.2 mA pada pipa dengan anoda silinder panjang, pipa dengan anoda silinder pendek membutuhkan arus 24.3 mA, sedangkan pipa dengan anoda kubus membutuhkan arus sebesar 8.2 mA. Data pada hari pertama cenderung belum stabil karena pipa masih dalam keadaan penyesuaian tegangan akibat pemberian arus. Dari data hari pertama menunjukkan bahwa pipa anoda silinder pendek membutuhkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan kedua pipa lainnya. Pada hari ke-2, ketiga pipa mulai mengalami penyesuaian namun mengalami peningkatan yang relatif normal. Pada hari ke-7 arus proteksi mengalami kenaikan yang tidak normal hingga mencapai 28-30 mA. Pada hari ke-8 sampai ke-15 kebutuhan arus proteksi mengalami penurunan mendekati I_o . Hari ke-16 sampai ke-20 kebutuhan arus mengalami tren yang meningkat hingga akhir pengujian.

Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada ketiga pipa tanpa coating terjadi pada hari ke-7 dimana kebutuhan arus meningkat hingga mencapai 28-30 mA. Pipa mengalami peningkatan yang sangat tinggi, kemungkinan terjadi akibat kondisi cuaca yang cukup buruk akibat hujan pada hari sebelumnya, dan juga kemungkinan adanya kabel tembaga mengalami berkarat akibat adanya lapisan tembaga yang terbuka, sehingga terjadi kebocoran arus saat memproteksi pipa. Kemungkinan lain adanya arus yang terbuang ke lingkungan. Hal ini kemudian dapat diatasi dengan pemberian arus pipa dihentikan selama satu malam guna mencegah terjadinya over. Pada hari ke-8 tren kebutuhan arus menurun

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



mengindikasikan pipa mulai kembali normal dan kebutuhan arus mendekati Io. Seiring berjalannya waktu ketiga pipa mengalami peningkatan arus proteksi. Hal ini bisa dikarenakan karena lapisan pipa mulai terserang korosi akibat adanya kontak dengan tanah sehingga memerlukan lebih banyak arus untuk memeroteksi pipa dari korosi. Pada ketiga pipa menggunakan anoda dengan dimensi yang berbeda. Pada pipa dengan dimensi silinder pendek, membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dibandingkan dengan pipa lainnya. Hal ini disebabkan karena anoda silinder pendek memiliki luas permukaan yang paling kecil yaitu sebesar 132.44 m², dibandingkan dengan anoda silinder panjang sebesar 142.42 m² dan anoda kubus 162.4 m². Luas permukaan anoda yang kecil menyebabkan arus keluaran maksimum dari anoda tersebut menjadi kecil pula sehingga membutuhkan arus proteksi yang besar, sebaliknya pipa dengan anoda kubus membutuhkan keluaran arus proteksi yang paling kecil dibandingkan dua pipa lainnya.

Pada pengujian pipa dengan coating primer dan sekunder, ketiga pipa membutuhkan arus proteksi sebesar yaitu 4.98 mA pada pipa dengan anoda silinder panjang, pipa dengan anoda silinder pendek membutuhkan arus 3.75 mA, sedangkan pipa dengan anoda kubus membutuhkan arus sebesar 4.66 mA pada hari pertama. Dari data hari pertama menunjukkan bahwa pipa anoda silinder panjang membutuhkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan kedua pipa lainnya. Pada hari ke-2, pipa anoda silinder panjang cenderung stabil di 5 mA, pipa anoda silinder pendek cenderung stabil pada 6 mA, sedangkan pipa anoda silinder kubus cenderung stabil pada 3 mA. Pada hari ke-9 arus proteksi mengalami kenaikan yang sangat tinggi sebanyak 7 mA dari hari sebelumnya. Pada berikutnya kebutuhan proteksi menurun. Hari ke-14 sampai ke-18 kebutuhan arus mengalami tren yang meningkat hingga akhir pengujian.

Kenaikan kebutuhan arus terbesar pada ketiga pipa coating primer dan sekunder terjadi pada hari ke-9 dimana kebutuhan arus meningkat hingga mencapai 7 mA dari pengukuran pada hari sebelumnya. Hal ini disebabkan terjadinya hujan yang cukup tinggi



menyebabkan resistivitas tanah turun drastis dari 146 Ohm.cm menjadi 93 Ohm.cm. hujan yang lebat membuat tanah menjadi lembab dan dapat meningkatkan proses korosi sehingga membutuhkan arus yang besar untuk memproteksinya. Pada hari berikutnya tren kebutuhan arus menurun seiring dengan meningkatnya resistivitas tanah. Pada hari ke-12 tren kebutuhan arus kembali meningkat akibat resistivitas tanah yang kembali menurun namun tidak drastis. Dan berlanjut hingga akhir pengujian. Pada ketiga pipa menggunakan anoda dengan dimensi yang berbeda. Pada pipa dengan dimensi silinder pendek, membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dibandingkan dengan pipa lainnya. Hal ini disebabkan karena anoda silinder pendek memiliki luas permukaan yang paling kecil yaitu sebesar 132.44 m², dibandingkan dengan anoda silinder panjang sebesar 142.42 m² dan anoda kubus 162.4 m². Hal ini dikarenakan permukaan anoda adalah tempat berkumpulnya elektron, maka semakin luas permukaan anoda membuat arus keluaran maksimum yang tinggi sehingga menurunkan rapat arus. Luas permukaan anoda yang kecil menyebabkan arus keluaran maksimum dari anoda tersebut menjadi kecil pula sehingga membutuhkan arus proteksi yang besar, sebaliknya pipa dengan anoda kubus membutuhkan keluaran arus proteksi yang paling kecil dibandingkan dua pipa lainnya. Sementara, Geometri anoda tidak mempengaruhi kebutuhan arus proteksi. Hal tersebut dikarenakan Hasil ini tidak dipengaruhi oleh bentuk anoda. Pipa dengan bentuk anoda yang berbeda bila memiliki luas permukaan yang sama maka hasilnya akan tetap sama.

Pipa dengan perlakuan tanpa coating cenderung memiliki kebutuhan arus yang lebih besar dibandingkan pipa yang menggunakan coating 2 lapis. Hal ini dapat dilihat dari tabel dimana rata-rata kebutuhan arus proteksi untuk pipa tanpa coating adalah antara 18mA-22mA sementara pipa dengan coating 2 lapis memiliki kebutuhan arus proteksi berkisar antara 6 mA-11mA. Hal ini membuktikan bahwa coating memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kebutuhan arus proteksi pada sistem ICCP.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Tabel 4.15 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder panjang

Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-962	11	-908
2	-890	12	-953
3	-873	13	-920
4	-967	14	-890
5	-867	15	-931
6	-906	16	-941
7	-913	17	-904
8	-924	18	-887
9	-897	19	-931
10	-911	20	-905
Rata-rata			-914

Tabel 4.16 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Silinder Pendek

Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-976	11	-923
2	-897	12	-980
3	-855	13	-978
4	-976	14	-867
5	-865	15	-890
6	-876	16	-913
7	-916	17	-903
8	-923	18	-876
9	-887	19	-890
10	-905	20	-907
Rata-rata			-910,15



Tabel 4.17 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating Anoda Kubus

Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-952	11	-913
2	-902	12	-967
3	-887	13	-960
4	-967	14	-932
5	-875	15	-941
6	-890	16	-931
7	-899	17	-922
8	-857	18	-902
9	-908	19	-908
10	-906	20	-890
Rata-rata			-915.45

Tabel 4.18 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Panjang

Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-929	11	-968
2	-894	12	-936
3	-907	13	-945
4	-902	14	-905
5	-953	15	-876
6	-936	16	-907
7	-977	17	-890
8	-936	18	-921
9	-930	19	-908
10	-948	20	-905
Rata-rata			-923.65

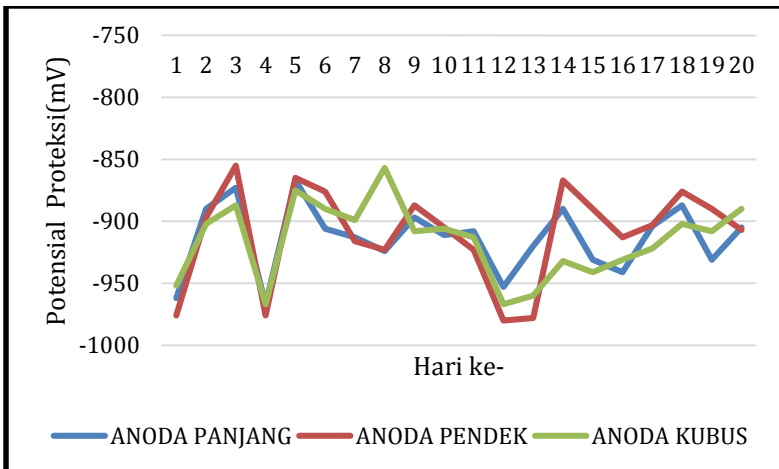


Tabel 4.19 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Silinder Pendek

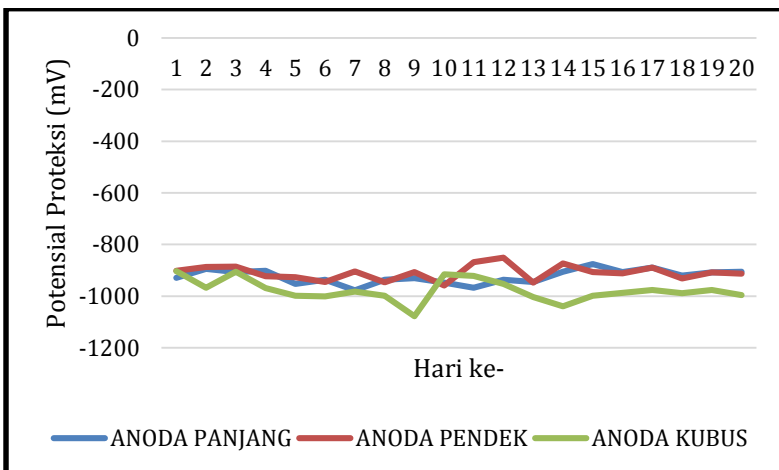
Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-902	11	-869
2	-887	12	-851
3	-886	13	-948
4	-923	14	-874
5	-927	15	-907
6	-945	16	-912
7	-904	17	-890
8	-947	18	-932
9	-907	19	-908
10	-959	20	-913
Rata-rata			-909.55

Tabel 4.20 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder Anoda Kubus

Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)	Hari Ke-	Potensial Proteksi (mV)
1	-903	11	-922
2	-968	12	-953
3	-905	13	-1003
4	-969	14	-1039
5	-998	15	-999
6	-1001	16	-987
7	-982	17	-976
8	-998	18	-989
9	-1078	19	-976
10	-915	20	-996
Rata-rata			-977.85



Gambar 4.5 Grafik Potensial Proteksi Pipa Tanpa Coating



Gambar 4.6 Grafik Potensial Proteksi Pipa Coating Primer dan Sekunder

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa pemasangan pipa awal memiliki range proteksi yang diharuskan yaitu -850 mV hingga -1100 mV. Setelah pipa tersebut diberi arus proteksi, arus

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



yang diberikan lebih tinggi dibandingkan dengan keperluan arus proteksi seharusnya. Namun seiring berjalan waktu dan pengontrolan arus yang dilakukan pipa coating dapat terus terjaga pada range proteksi.

Tabel 4.21 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Tanpa Coating Setelah Proteksi

Bentuk Anoda	Potensial Pipa (mV)
Bentuk Kubus	-678
Bentuk Silinder Panjang	-627
Bentuk Silinder Pendek	-707

Tabel 4.22 Hasil Pengukuran Potensial Pipa Coating Primer dan Sekunder Setelah Proteksi

Bentuk Anoda	Potensial Pipa (mV)
Bentuk Kubus	-783
Bentuk Silinder Panjang	-722
Bentuk Silinder Pendek	-706

4.5 Hasil Proteksi

Setelah 20 hari, pipa yang telah ditanam dan diberi proteksi arus paksa diangkat untuk mengetahui kondisi pipa. Pengamatan meliputi; pengamatan pipa secara utuh, pengamatan sambungan las baut pipa, pengamatan ujung pipa dan pengamatan permukaan pipa. Hal yang diamati antara lain, bentuk korosi yang terjadi, bentuk permukaan, dan hal-hal lain yang dapat mempengaruhi hasil pengamatan

Pengamatan secara visual diperlukan untuk mengetahui apakah system rancangan yang dilakukan sudah berjalan dengan baik, apakah hasil pengamatan visual dapat memperkuat data dan hipotesis yang ada. Hasil Pengamatan kemudian dapat dijadikan acuan untuk penelitian lainnya.



(a)



(b)

Gambar 4.7 Pipa Tanpa Coating setelah 20 hari pemberian arus proteksi a.) pipa anoda silinder pendek b) pipa anoda silinder panjang



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Pipa dengan coating Primer dan Sekunder setelah 20 hari pemberian arus proteksi a) pipa anoda silinder panjang b) pipa anoda silinder pendek c) pipa anoda kubus

Pada pipa dengan tanpa coating, permukaan pipa mengalami kerusakan berupa terkelupasnya lapisan permukaan pipa dan mengalami korosi. Permukaan pipa juga terasa kasar akibat adanya peristiwa korosi. Sedangkan pada pipa dengan coating ganda (primer dan sekunder) kondisi lapisan coating sekunder cenderung masih baik hanya terkelupas pada beberapa titik, dan lapisan primernya beberapa ada yang terkorosi. Dan permukaan pipa coating dua lapis cenderung halus.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.9 Permukaan pipa tanpa coating setelah 20 hari a) pipa anoda silinder panjang b) pipa anoda silinder pendek c) pipa anoda kubus



(a)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



(b)



(c)

Gambar 4.10 Permukaan pipa coating primer dan Sekunder setelah 20 hari a) pipa anoda silinder panjang b) pipa anoda silinder pendek c) pipa anoda kubus



Pada daerah sambungan mur atau lasan. Korosi atau karat terjadi pada pipa baik coating ganda maupun tanpa coating.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Sambungan lasan pada pipa tanpa coating a) pipa anoda silinder panjang b) pipa anoda silinder pendek c) pipa anoda kubus



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.12 Sambungan lasan pada pipa coating primer dan sekunder a) pipa anoda silinder panjang b) pipa anoda silinder pendek c) pipa anoda kubus

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Permukaan pada masing-masing pipa juga terlihat beberapa tanda mulai mengalami pengkorosian.



Gambar 4.13 Permukaan Pipa Tanpa Coating



Gambar 4.14 Permukaan Pipa Coating Dua Lapis



Dalam proteksi katodik arus paksa penggunaan coating tidak hanya mengurangi kebutuhan arus proteksi namun dapat membantu proteksi pipa secara signifikan, Dilihat dari kedua gambar diatas dimana permukaan pada pipa tanpa coating sudah mengalami korosi, namun, permukaan pada pipa coating dua lapis masih tergolong aman, namun terdapat beberapa bercak rembesan akibat adanya kontak dengan lingkungan. Hal ini dapat menghemat penggunaan anoda serta dapat melindungi pipa secara lebih maksimal.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Kebutuhan Arus Proteksi untuk Pipa dengan luas 0.239 m^2 pada pipa tanpa coating adalah sebesar 20,193 mA sedangkan kebutuhan arus pada pipa coating dua lapis adalah 0.2617 mA. Kebutuhan anoda untuk rancangan sistem ICCP selama 2 tahun pada pipa tanpa coating adalah 63.1 gram sedangkan untuk pipa coating dua lapis sebesar 8.17 gram.
2. Luas permukaan anoda dapat mempengaruhi kebutuhan arus proteksi. Pipa anoda kubus memiliki luas yang paling besar yaitu 162.4 m^2 dan menghasilkan arus proteksi paling kecil sebesar 6.19 mA dan 18.78 mA.
Hal ini dikarenakan permukaan anoda adalah tempat berkumpulnya elektron, maka semakin luas permukaan anoda membuat arus keluaran maksimum yang tinggi sehingga menurunkan rapat arus.
3. Geometri anoda tidak mempengaruhi kebutuhan arus proteksi. Pipa anoda silinder pendek memerlukan arus proteksi yang paling besar yaitu 11.34 mA dan 24.14 mA, Pipa anoda silinder panjang memerlukan arus sebesar 8.17 mA dan 20.58 mA, sedangkan pipa anoda kubus memerlukan arus proteksi paling kecil sebesar 6.19 mA dan 18.78 mA. Hasil ini tidak dipengaruhi oleh bentuk anoda.
4. Pipa dengan variasi coating dua lapis membutuhkan arus proteksi sebesar 5-11 mA lebih kecil bila dibandingkan dengan pipa tanpa coating yaitu sebesar 18-22 mA.
Hal ini disebabkan pipa coating dua lapis mampu memberikan perlindungan pada pipa sehingga permukaan pipa tidak mengalami kontak langsung dengan lingkungan sehingga memerlukan arus proteksi yang lebih kecil



5.2 Saran

Saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Perlunya memperhatikan penggunaan kabel tembaga yang tebal saat melakukan penelitian guna menghindari terjadinya kebocoran arus dan arus dapat mengalir secara maksimal.
2. Hindari adanya kabel tembaga yang terbuka agar tembaga tidak terkorosi.
3. Memastikan penggunaan rectifier dapat berfungsi sampai dengan arus yang sangat kecil sehingga hasil dapat lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. (2001). *United States of America Patent No. G57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four - Electrode Method*.
- Francis, Robert A. 2005. *Corrosion Control*. South Melbourne. Australia: Melbourne University Publishing
- Garverick, Linda (1994). *Corrosion in Petrochemical Industry*. Ohio. ASM International.
- Gummow, A. 2010. *Examining The Controversy Surrounding -850 mV CP Criteria*, Pipeline and Gas Journal. Texas: Oildom Publishing Company Inc.
- Jones, Denny A. (1991). *Principles and Prevention of Corrosion*. Washington. Prentice-Hall Inc. 2nd ed. 442-4
- Labolatory, B. o. (2013). *Corrosion and Cathodic Protection*. Denver: Bureau of Reclamation Materials Engineering Research Laboratory, Denver Federal Center
- Leeds, Sarah. 2008. *Cathodic Protection. A Major Contributor to Pipeline Integrity but How Does It Really Work and What Are Its Limitations in Terms of Operational Controls*. Pipeline Integrity Management.
- NACE. (1997). *Houston, TX Patent No. RP-0268-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines*
- NACE International. 2007. *CP-1 Cathodic Protection Tester Manual*. USA.
- NACE. (2012). *Houston, TX Patent No. TM0457- 2012 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*
- NACE. (2013). *Houston, TX Patent No. SP0169- 2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System*.
- Pasaribu, L. (2011). *Studi Analisis Pengaruh Jenis Tanah, Kelembaban, Temperatur, dan Kadar Garam Terhadap*



- Tahanan Pertanian Tanah. Depok: Universitas Indonesia.
- Peabody, A. (2001). *Control of Pipeline Corrosion, Second Edition*. Texas: NACE International.
- Roberge, Pierre R. 1999. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: Mc Graw-Hill Book Company
- Shreir, L. L, R. A. and Jarman, G. T. Burstein. 1994. *Corrosion Control, vol. 2*. Oxford: Butter Worth – Heinemann Ltd.
- Shobah, M. Nurus. 2014. *Pengaruh Goresan Lapis Lindung dan Salinitas Air Laut Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B,*” Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Tubagus Noor R, dkk. *Pengaruh Kondisi Tanah Asam Dan Cacat Gores Berbentuk Persegi Panjang Pada Lapis Lindung Terhadap Kebutuhan Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (Iccp) Dengan Menggunakan Baja Aisi 1045*. Teknoin Vol. 20 No. 1 Maret 2014: 01-11
- Tubagus Noor R, dkk. *Perancangan Proteksi Arus Paksa Pada Pipa Baja Api 5l Dengan Coating Dan Tanpa Coating Di Dalam Tanah*. Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2016 VOLUME V, OKTOBER 2016
- Wu, J. Dkk. 2009. *The Influence of Coating Damage on The ICCP Cathodic Protection Effect*. Luoyang Ship Material Research Institute. P.R China



LAMPIRAN

Perhitungan Perancangan Desain ICCP

1 Perancangan ICCP pada Pipa Coating Primer

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$\begin{aligned} A &= \pi \times D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0736 \times 1.5 \\ &= 0.346656 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

2. Konduktansi Lapis Pelindung

$$\begin{aligned} g &= (\pi \times D) / \omega \\ &= \frac{3.14 \times 0.0736}{20} \\ &= 0.0115552 \text{ Ohm. m}^{-1} \end{aligned}$$

3. Tahanan Pipa

$$\begin{aligned} r &= P_{\text{pipa}} / (\pi t (D-t)) \\ &= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)} \\ &= 0.058647066 \text{ Ohm. m}^{-1} \end{aligned}$$

4. Konstanta Atenuasi

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{(r \times g)} \\ &= \sqrt{0.058647066 \times 0.0115552} \\ &= 0.02603226 \end{aligned}$$

5. Tahanan Karakteristik Pipa

$$\begin{aligned} r_p &= \sqrt{(r/g)} \\ &= \sqrt{\frac{0.058647066}{0.0115552}} \\ &= 2.252861067 \end{aligned}$$

6. Kebutuhan Arus Proteksi

$$\begin{aligned} I_o &= (A \times CD \times CB \times Sf) / 1000 \\ &= \frac{0.346656 \times 20 \times 0.2}{1000} \times (1.25) \\ &= 0.00173328 \text{ A} \\ &= 1.73328 \text{ mA} \end{aligned}$$



7. Keperluan Arus DC Minimum

$$\begin{aligned} IR &\geq I_o \times Sf \\ IR &\geq 1.73328 \times 1.25 \\ IR &\geq 2.1666 \text{ mA} \end{aligned}$$

8. Berat Anoda

$$\begin{aligned} W_o &= (Y \times C \times IR) / U \\ &= \frac{2 \times 2 \times 0.0021666}{80\%} \\ &= 0.010833 \text{ kg} \end{aligned}$$

9. Jumlah Anoda

$$\begin{aligned} n &= (W_o / W) \times Sf \\ &= \frac{0.00155}{0.2} \times 1.25 \\ &= 0.0677 \text{ kg} \end{aligned}$$

2 Perancangan ICCP pada Pipa Coating Primer dan Sekunder

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$\begin{aligned} A &= \pi \times D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0736 \times 1.5 \\ &= 0.346656 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

2. Konduktansi Lapis Pelindung

$$\begin{aligned} g &= (\pi \times D) / \omega \\ &= \frac{3.14 \times 0.0736}{3.5} \\ &= 0.06603 \text{ Ohm. m}^{-1} \end{aligned}$$

3. Tahanan Pipa

$$\begin{aligned} r &= P_{\text{pipa}} / (\pi t (D-t)) \\ &= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)} \\ &= 0.058647066 \text{ Ohm. m}^{-1} \end{aligned}$$

4. Konstanta Atenuasi

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{(r \times g)} \\ &= \sqrt{0.058647066 \times 0.06603} \\ &= 0.06229004 \end{aligned}$$



5. Tahanan Karakteristik Pipa

$$\begin{aligned}r_p &= \sqrt{(r/g)} \\&= \sqrt{\frac{0.058647066}{0.06603}} \\&= 0.9424394\end{aligned}$$

6. Kebutuhan Arus Proteksi

$$\begin{aligned}I_o &= (A \times CD \times CB \times Sf)/1000 \\&= \frac{0.346656 \times 20 \times 0.035}{1000} \times (1.25) \\&= 0.000303324 \text{ A} \\&= 0.303324 \text{ mA}\end{aligned}$$

7. Keperluan Arus DC Minimum

$$\begin{aligned}IR &\geq I_o \times Sf \\IR &\geq 0.303324 \times 1.25 \\IR &\geq 0.379155 \text{ mA}\end{aligned}$$

8. Berat Anoda

$$\begin{aligned}W_o &= (Y \times C \times IR)/U \\&= \frac{2 \times 2 \times 0.000379155}{80\%} \\&= 0.001895 \text{ kg}\end{aligned}$$

9. Jumlah Anoda

$$\begin{aligned}n &= (W_o/W) \times Sf \\&= \frac{0.00155}{0.2} \times 1.25 \\&= 0.01185 \text{ kg}\end{aligned}$$



(Halaman ini Sengaja dikosongkan)



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Palembang pada tanggal 16 September 1995 dari ayah bernama Barita Robert dan ibu bernama Hery Unita Versitaria. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Saat ini penulis berdomisili di Jalan DMC Raya No. 10 Komplek DMC, Bekasi. Pada tahun 2007, penulis menyelesaikan pendidikan di SD Kartika II-2 Palembang, Tahun 2010 menyelesaikan pendidikan tingkat menengah di SMPN 9 Palembang. Tahun 2013 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 17 Palembang. Dan sekarang penulis sedang menempuh pendidikan S1 semester 8 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Semasa kuliah penulis aktif dalam ormawa ITS sebagai staf Departemen Keilmiahan HMMT pada tahun 2014. Selain aktif di ormawa, penulis juga aktif dalam kepanitiaan seperti menjabat sebagai kepanitiaan YES SUMMIT 2014 dan 2015, AIESEC 2014, serta TedXTuguPahlawan Surabaya sejak 2015. Penulis dapat dihubungi melalui email bednurhadi@gmail.com.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)